



EPS

Escola Politècnica
Superior

Projecte/Treball Fi de Carrera

Estudi: Enginyeria Industrial. Pla 2002

Títol: Estudi de la influència del lubricant en operacions de mecanització

Document: Memòria i annexos

Alumne: Jordi Grabalosa Saubí

Director/Tutor: Joaquim de Ciurana

Departament: Eng. Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Enginyeria de processos de fabricació

Convocatòria (mes/any): 02/2011

Índex

1	Introducció	4
1.1	Antecedents	4
1.2	Objecte	4
1.3	Abast.....	5
2	Experimentació	6
2.1	Conceptes previs	6
2.1.1	Mecanització amb arrencament de material.....	6
2.1.2	Utilització d'olis de tall	7
2.1.3	Mínima quantitat de lubricant (MQL)	8
2.1.4	Rugositat superficial.....	8
2.2	Selecció dels paràmetres de mecanització	10
2.3	Quadre d'experiments	12
2.4	Procediment experimental.....	13
3	Resultats.....	16
3.1	Experiment 1	17
3.1.1	Rugositat superficial.....	17
3.1.2	Forces de tall	18
3.1.3	Estat de l'eina	19
3.2	Experiment 2	20
3.2.1	Rugositat superficial.....	20
3.2.2	Forces de tall	21
3.2.3	Estat de l'eina	22
3.3	Experiment 3	23
3.3.1	Rugositat superficial.....	23
3.3.2	Forces de tall	24
3.3.3	Estat de l'eina	25
3.4	Experiment 4	26
3.4.1	Rugositat superficial.....	26
3.4.2	Forces de tall	27
3.4.3	Estat de l'eina	28
3.5	Experiment 5	29
3.5.1	Rugositat superficial.....	29

3.5.2	Forces de tall	30
3.5.3	Estat de l'eina	31
3.6	Experiment 6	32
3.6.1	Rugositat superficial	32
3.6.2	Forces de tall	33
3.6.3	Estat de l'eina	34
3.7	Experiment 7	35
3.7.1	Rugositat superficial	35
3.7.2	Forces de tall	36
3.7.3	Estat de l'eina	37
3.8	Experiment 8	38
3.8.1	Rugositat superficial	38
3.8.2	Forces de tall	39
3.8.3	Estat de l'eina	40
3.9	Experiment 9	41
3.9.1	Rugositat superficial	41
3.9.2	Forces de tall	42
3.9.3	Estat de l'eina	43
3.10	Experiment 10	44
3.10.1	Rugositat superficial	44
3.10.2	Forces de tall	45
3.10.3	Estat de l'eina	46
3.11	Experiment 11	47
3.11.1	Rugositat superficial	47
3.11.2	Forces de tall	48
3.11.3	Estat de l'eina	49
3.12	Experiment 12	50
3.12.1	Rugositat superficial	50
3.12.2	Forces de tall	51
3.12.3	Estat de l'eina	52
4	Comparativa dels sistemes de lubricació	53
4.1	Grup 1	53
4.2	Grup 2	55
4.3	Grup 3	57

4.4	Grup 4.....	59
5	Altres comparatius	61
5.1	Comparativa segons diàmetre d'eina	61
5.2	Comparativa segons velocitat d'avanç.....	64
5.2.1	Experimentació amb eines de diàmetre 6mm	64
5.2.2	Experimentació amb eines de diàmetre 16mm	66
6	Resum del pressupost	68
7	Conclusions.....	69
8	Bibliografia	71
Annex A.	Aparells utilitzats	72
	Deckel Maho 64V Linear	72
	Rugosímetre Mitutoyo Surf test SV-2000	73
	Taula dinamomètrica Kistler 9257B	74
Annex B.	Sistema de polvorització del lubricant.....	75
Annex C.	Programes utilitzats	78
	Conceptes previs	78
	Programes utilitzats.....	78
	Codi.....	79
Annex D.	Tractament de forces	81
	Programa <i>FT.m</i>	82
Annex E.	Dades de rugositat	83
Annex F.	Pressupost	94

1 Introducció

1.1 Antecedents

Els processos de mecanització per arrancada de ferritja són processos en els quals s'obté la forma desitjada mitjançant l'eliminació de material. Aquesta eliminació es duu a terme a través d'eines de tall, les quals es troben sotmeses a importants forces i desgasts. Per aquest motiu, s'introdueixen olis de tall, per intentar allargar la vida de l'eina i millorar les condicions de tall.

En la majoria de les aplicacions, aquests olis de tall es subministren a raig, sense escatimar en quantitat, ja que és la solució més senzilla per refrigerar les eines de tall. Aquests olis de tall, al cap d'un temps de ser utilitzats perden les seves propietats, ja sigui per causes d'estrès mecànic i tèrmic, o perquè cada vegada contenen més impureses i s'han de canviar. Aquest és un dels principals problemes, ja que la normativa espanyola classifica aquest residu com a perillós, comportant un posterior tractament.

A part, les millores tecnològiques permeten noves aplicacions d'aquests olis de tall, focalitzant-ne l'aplicació als punts on és estrictament necessari, les superfícies en contacte, reduint considerablement la quantitat de fluid necessària. Si a més, aquests fluids se subministren en forma d'aerosol i a més pressió, s'aconsegueix que les partícules de lubricant arribin als espais més complicats més ràpidament [11].

Per aquests motius s'investiga el nou sistema de lubricació, anomenada *Minimal Quantity Lubrication (MQL)*. Aquest sistema subministra els olis de tall en forma d'aerosol, fet que comporta els avantatges comentats. Si a més s'utilitzen olis biodegradables, s'elimina el posterior tractament de residus que comporten els olis de tall tradicionals [1], [2], [3], [8].

1.2 Objecte

Els sistemes de *MQL*, a part dels avantatges citats, presumeix de millorar les condicions de tall, augmentant la vida de les eines i també d'un millor acabat superficial com a conseqüència d'una millor lubricació.

El treball té per objecte estudiar el possible ús dels olis de tall convencionals subministrant-los tal i com es faria amb un sistema de mínima quantitat de lubricant, per tal de comparar-lo amb el sistema tradicional de lubricació.

També s'estudia la influència sobre el desgast de l'eina i com afecta el tipus de lubricació a les propietats superficials, concretament sobre la rugositat superficial impresa per l'eina al material mecanitzat.

Durant els processos de mecanització, es mesuren les forces de tall dels diferents experiments per buscar diferències entre els nivells de lubricant assajats.

1.3 Abast

En aquest treball es busca estudiar l'ús del refrigerant subministrat en forma d'aerosol. Per això es mecanitzen peces d'alumini treballant amb l'eina immersa dins el material. Es realitzen assaigs amb tres nivells de lubricant. Els assaigs sense lubricant, els assaigs amb el sistema de lubricació convencional i assaigs emulant la mínima quantitat de lubricant. Per aquests últims assaigs, es necessita trobar un mètode per subministrar l'oli de tall com un aerosol.

Dins els diferents nivells de lubricant, es faran assaigs amb diferents velocitats d'avanç i amb eines de diàmetre diferent, per tal de veure la influència que tenen aquests factors sobre les propietats estudiades.

Dels diferents assaigs, es prendran mesures de rugositat superficial durant tot el procés de mecanització, per veure'n, a part de la magnitud, l'evolució d'aquesta i poder comparar-la pels diferents experiments realitzats. També es prendran mesures de força i es farà una valoració de l'estat de l'eina per tal de poder quantificar el desgast provocat.

2 Experimentació

2.1 Conceptes previs

2.1.1 Mecanització amb arrencament de material

Els processos de fabricació per arrancada de ferritja es basen en transformar una peça mitjançant l'eliminació de material, formant la denominada ferritja. Aquesta eliminació de material s'aconsegueix mitjançant les eines de tall [4].

Les principals qualitats que ha de presentar tota eina de tall són:

- Duresa a alta temperatura
- Alta resistència al desgast
- Baix coeficient de fricció
- Resistència elevada
- Bones propietats tèrmiques

Per tal de complir les propietats citades, es fabriquen eines d'acer, acers aliats, carburs metàl·lics, materials ceràmics i finalment, les eines més dures, les de punta de diamant.

A l'hora de mecanitzar, els processos amb arrencament de ferritja es concreten definint diferents paràmetres, entre els que es destaquen:

- Profunditat de passada. És la magnitud corresponent a la penetració de l'eina a la peça a mecanitzar.
- Velocitat d'avanç. És la velocitat a la qual s'acosta l'eina al material per tal d'arrancar-lo.
- Velocitat de tall. És la velocitat relativa entre l'eina i el material que s'ha d'arrencar. En el centre de mecanitzat, aquesta velocitat es determina per la velocitat de rotació de l'eina.

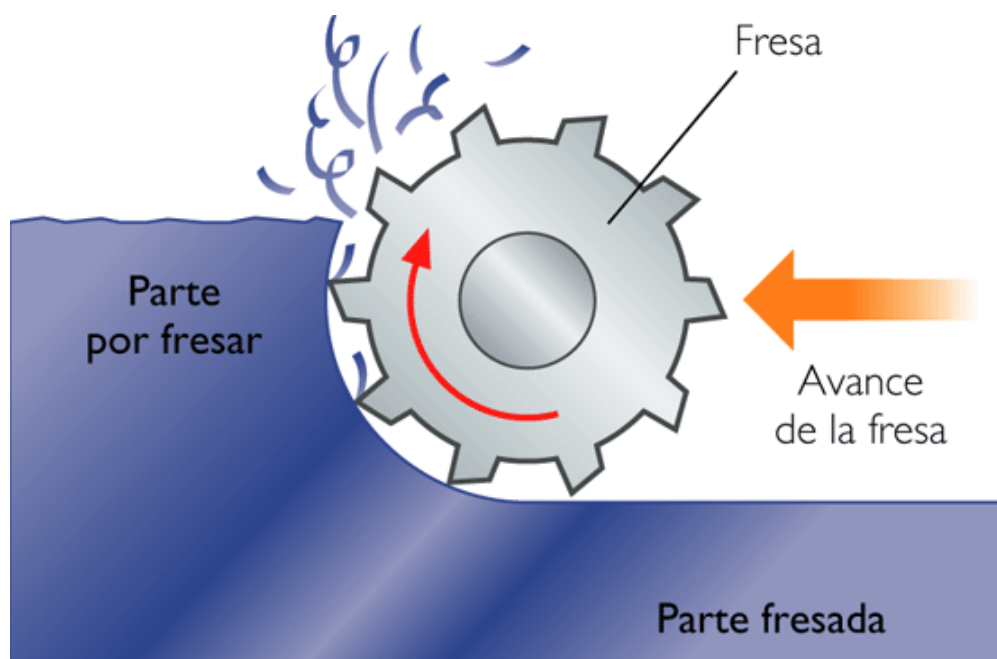


Figura 2-1. Esquema d'un procés de mecanització.

A la Figura 2-1 es mostra un esquema d'un procés de mecanització amb arrencada de material. Aquest cas, s'assimila al centre de mecanitzat. Contemplant la Figura 2-1 com una planta del procés, la profunditat de passada correspon al gruix de l'eina que es troba immers dins el material. La velocitat de rotació correspon a fletxa prima de dins l'eina, i la velocitat d'avanç, la fletxa gruixuda taronja.

Segons la qualitat dels acabats que es requereixin, es treballa amb unes o altres condicions. En operacions de desbast, on interessa arrancar material, es treballa amb profunditats de passada i velocitats altes, per tal de d'arrencar el màxim material, mentre que en operacions d'acabat, on es busquen unes mesures i toleràncies concretes, així com un bon acabat superficial, es treballa amb profunditats de passada i velocitats d'avanç baixos, i amb velocitats de tall altes.

Un altre aspecte a tenir molt en compte a l'hora d'escollir les condicions de tall és el desgast de les eines de tall. Les principals causes de desgast són:

- Adhesió. Es produeix quan es posen en contacte dues superfícies metàl·liques i s'origina una força de soldadura entre aquestes. A l'arrencar la ferritja, s'arrenquen també petites partícules de l'eina.
- Abrasió. Degut a la deformació de la peça treballada, es produeix també l'enduriment d'algunes partícules de la superfície del material. Aquestes partícules més dures, produeixen un major desgast a l'eina per fregament.
- Difusió. És un fenomen microscòpic que consisteix en la transmissió d'àtoms entre els dos materials en contacte. Aquest efecte, augmenta amb la temperatura i amb l'afinitat entre materials.

2.1.2 Utilització d'olis de tall

L'oli de tall és el líquid que es bombeja sobre el fil de tall de les eines per millorar les condicions durant el procés de mecanització. Els principals objectius d'utilitzar un oli de tall són:

- Dissipar la calor produïda pel contacte metàl·lic entre l'eina i la peça actuant com a refrigerant. És important per disminuir la temperatura de la peça i l'eina, però també és molt important perquè no es produeixin dilatacions a causa de la temperatura.
- Lubrificar les superfícies en contacte per reduir el desgast de l'eina de tall.
- Reduir l'energia necessària perquè es produeixi el tall.
- Protegir la peça, la màquina i l'eina contra la corrosió.
- Evacuar la ferritja de la zona de tall.

Per tal de complir aquests objectius, qualsevol oli de tall ha de posseir les següents propietats:

- Calor específic alt, per dissipar més calor.
- Poca viscositat, per tal que el líquid sigui fluid.
- Protecció contra la corrosió.
- Alt punt d'inflamació.
- Evitar la formació d'espuma al ser agitat.

2.1.3 Mínima quantitat de lubricant (MQL)

Aquest sistema de refrigeració consisteix en subministrar molt poca quantitat de lubricant, i fer-ho únicament als punts on hi ha contacte, ja que a efectes pràctics, són els punts on cal actuar, perquè són els que més es desgasten i els que més s'escalfen.

La principal diferència entre el sistema MQL (*Minimal Quantity Lubrication*) i el sistema de lubricació tradicional, és que els fluids de tall convencionals es substitueixen per un aerosol biodegradable format amb una quantitat molt petita d'olis no solubles en aigua.

Dins dels avantatges que comporta aquest sistema, cal esmentar:

- Major productivitat, ja que es pot treballar amb paràmetres de tall més elevats, i es redueixen els temps de producció. Això es deu al fet que la lubricació és més bona, ja que el lubricant arriba just a les zones on es necessita i hi arriba més ràpid. A més, també hi ajuda la utilització d'aparells més precisos, ja que en la lubricació convencional, l'oli de tall es subministra a raig i des de punts més apartats.
- Menor desgast de les eines. Segons els autors, es pot allargar la vida de l'eina tres vegades. Aquest augment de la vida de l'eina es produeix perquè la utilització d'aquest mètode, redueix el xoc tèrmic que es produeix al entrar en contacte un cos calent, l'eina, amb el líquid refrigerant. Al treballar amb aerosols, aquest impacte es redueix, allargant així la vida de l'eina. A part, el fet de millorar la lubricació també ajuda
- Millors acabats superficials, com a conseqüència de la reducció de la rugositat superficial al subministrar el lubricant amb més precisió i amb gotes de menor mida, permetent arribar a gairebé tots els punts.
- El procés s'assimila al de la mecanització en sec. Per tant, les peces surten netes de la màquina, estalviant temps de neteja d'aquestes. A part, al tenir una concentració de lubricant molt reduïda, comporta avantatges per la salut.
- Més ecològic. Al no haver-hi mescla entre aigua i l'oli de tall, no hi ha possible contaminació de l'aigua, també desapareix el problema d'eliminar els residus.
- Entorn de treball molt més net i saludable.

2.1.4 Rugositat superficial

Les propietats superficials tenen una influència molt important sobre les propietats de la peça. Algunes d'aquestes són:

- La precisió dimensional.
- El coeficient de fricció.
- El desgast.
- La resistència a la corrosió.
- El comportament a fatiga.

A l'hora de definir les característiques d'una superfície es tenen en compte paràmetres com per exemple la rugositat, les ondulacions i les imperfeccions. Les ondulacions es solen produir degut a processos de flexió o sota variacions de temperatura, i les imperfeccions són efectes no controlables.

En canvi, la rugositat superficial, es troba molt influenciada pel tipus de material i sobretot pel procés de mecanització.

La rugositat superficial fa referència a petites variacions respecte la superfície nominal. A la Figura 2-2 es mostra un esquema de la rugositat superficial. Es veu que es caracteritza per diferents pics i valls que s'allunyen del que en teoria hauria de ser una superfície completament llisa.

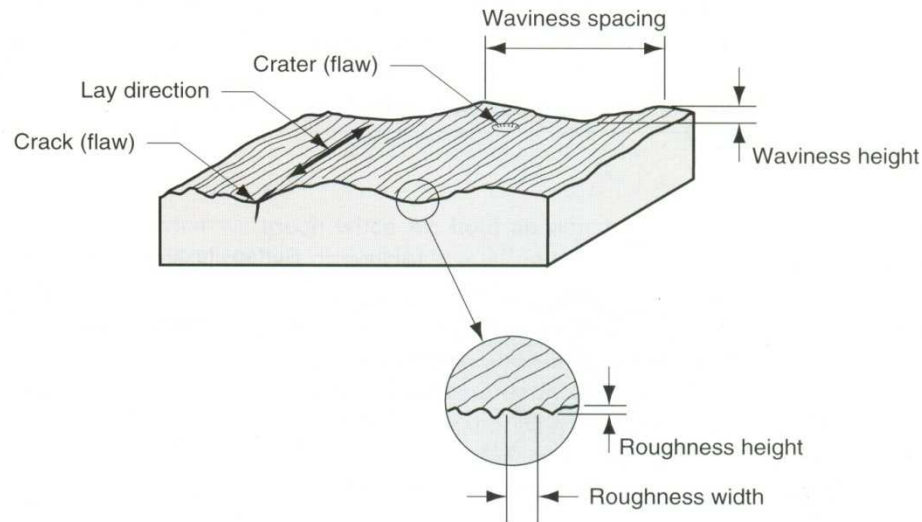


Figura 2-2. Esquema de la rugositat superficial sobre una peça

Dins la mesura de rugositat, no es tenen en compte els errors de forma ni el de les ondulacions del material. Això s'aconsegueix mitjançant la utilització de filtres per part del rugosímetre, que elimina les ondulacions causades per la geometria de la peça, mostrant la rugositat respecte una superfície plana.

El paràmetre mesurat és el valor mig de la rugositat (Ra) que s'expressa amb micròmetres (μm). Aquest valor és la suma de les distàncies dels diferents pics i valls respecte una línia mitja, que divideix el perfil mesurat en dues parts, de tal manera que l'àrea de material per sobre i per sota d'aquesta línia siguin iguals.

2.2 Selecció dels paràmetres de mecanització

A l'hora de triar els paràmetres usats durant el procés de mecanització s'han pres com a referència els paràmetres recomanats pel fabricant de l'eina, la referència de la qual és AM2MR de la casa Mitsubishi [9]. Aquests es troben resumits a la Taula 2-1. Com que el centre de mecanitzat usat no proporciona la velocitat de rotació recomanada, com a molt permet arribar a les 12000rpm, s'ha fixat aquesta com la velocitat de rotació màxima a utilitzar.

Diàmetre (mm)	Velocitat de rotació (rpm)	Avanç lineal (mm/min)
6	20000	2800-4000
16	10000	3600-4500

Taula 2-1. Paràmetres de mecanització recomanats pel fabricant.

Per tant, l'experimentació es farà amb una velocitat de rotació màxima de 12000 rpm, que s'assigna a l'eina de 6mm de diàmetre.

Per poder fer els assaigs de les diferents eines comparables, es mantindrà la velocitat de tall constant, és a dir, la velocitat lineal de la perifèria de l'eina s'ha de mantenir constant. Aquesta velocitat de tall es calcula segons l'equació (2.1), i determina aquesta en funció del diàmetre de l'eina i la velocitat de rotació.

$$V_c = \frac{n \cdot \pi \cdot D}{1000} \quad (2.1)$$

V_c velocitat de tall en m/min
 n velocitat de rotació en rpm
 D diàmetre de l'eina en mm

Així doncs, igualant les velocitats de tall per a fer comparables els experiments i substituint els valors dels diàmetre de l'eina, s'obté l'expressió (2.2), que relaciona les velocitats de rotació en funció dels diàmetres de l'eina per treballar amb la mateixa velocitat de tall. El subíndex de la velocitat de rotació n , fa referència al diàmetre de l'eina utilitzada.

$$n_{16} = \frac{6}{16} \cdot n_6 \quad (2.2)$$

De la mateixa manera que es relacionen les velocitats de rotació per poder comprar els experiments, també és necessari trobar la relació entre els avanços lineals per poder fer comparables els resultats. En aquest cas, el paràmetre que es manté constant, és l'avanç per dent, calculat segons l'equació (2.3). El paràmetre de l'avanç per dent indica la quantitat de material (entesa com a distància lineal) que arrenca cadascuna de les dents de l'eina a cada volta.

$$f_z = \frac{F}{n \cdot Z} \quad (2.3)$$

f_z avanç per dent en mm/dent
 F avanç lineal en mm/min

Z número de dents de l'eina

Com es pot apreciar, l'avanç per dent depèn de la velocitat de rotació, i són inversament proporcionals. Per tant, al reduir-la, l'avanç per dent augmenta. Es pot donar el cas que s'experimenti amb un avanç per dent massa elevat, fet que provocaria el trencament de l'eina.

Així doncs, prèviament cal calcular l'avanç per dent recomanat segons Mitsubishi. Amb els valors de la Taula 2-1 es calculen els avanços per dent recomanats, mostrats a Taula 2-2, els quals seran els límits a no sobrepassar.

Diàmetre (mm)	Avanç per dent (mm/dent)
6	0.1
16	0.225

Taula 2-2. Avanç per dent recomanat pel fabricant.

Com que els avanços són força diferents, se n'utilitzen tres de diferents. Un d'una mica inferior als 0.1mm/dent, el qual s'experimenta amb els dos diàmetres d'eina i així es podran comparar els resultats. Pel que fa als altres dos, se n'escull un que sigui la meitat, experiment per l'eina de diàmetre 6mm i una que sigui el doble, experiment per l'eina de diàmetre 16mm. A la Taula 2-3 es mostra un resum dels diferents paràmetres experimentats en funció del diàmetre de l'eina.

Paràmetre	Valors experimentats	
	Eina 6mm	Eina 16mm
Velocitat de rotació [rpm]	12000	4500
Avanç lineal [mm/min]	2000 i 1000	1500 i 750
Avanç per dent [mm/dent]	0.083 i 0.047	0.166 i 0.083
Nivells de lubricant	Sec, esprai i oli de tall	Sec, esprai i oli de tall

Taula 2-3. Taula resum dels paràmetres de mecanització.

2.3 Quadre d'experiments

A la Taula 2-4 es mostren el conjunt d'experiments realitzats, indicant en cadascun d'ells els paràmetres de tall.

Número d'experiment	Paràmetres mecanització	Número d'experiment	Paràmetres mecanització
Experiment 1	Eina 6mm n=12000rpm F=2000mm/min Sec	Experiment 7	Eina 16mm n=4500rpm F=1500mm/min Sec
Experiment 2	Eina 6mm n=12000rpm F=2000mm/min Oli de tall a raig	Experiment 8	Eina 16mm n=4500rpm F=1500mm/min Oli de tall a raig
Experiment 3	Eina 16mm n=4500rpm F=750mm/min Sec	Experiment 9	Eina 6mm n=12000rpm F=2000mm/min Esprai
Experiment 4	Eina 16mm n=4500rpm F=750mm/min Oli de tall a raig	Experiment 10	Eina 6mm n=12000rpm F=1000mm/min Esprai
Experiment 5	Eina 6mm n=12000rpm F=1000mm/min Sec	Experiment 11	Eina 16mm n=4500rpm F=750mm/min Esprai
Experiment 6	Eina 6mm n=12000rpm F=1000mm/min Oli de tall a raig	Experiment 12	Eina 16mm n=4500rpm F=1500mm/min Esprai

Taula 2-4. Taula resum d'experiments.

2.4 Procediment experimental

Per la realització dels experiments, s'ha decidit fer treballar l'eina en immersió, és a dir, fent-la treballar per ambdós costats alhora, per així aconseguir un major desgast a cada passada. Així doncs, es mecanitzaran un seguit de ranures, de profunditat 1mm al llarg d'un bolc d'alumini.

La longitud dels blocs no pot ser excessivament llarga, ja que la mordassa que s'acolla damunt la taula dinamomètrica *Kistler*, té una longitud de quinze centímetres. Per tant, els blocs d'alumini cal que tinguin una longitud que no provoqui vibracions a l'hora de mecanitzar. És per això, que la majoria de blocs són de setze centímetres de longitud, i alguns altres, quan es mecanitza amb l'eina de diàmetre petit, de vint. A la Figura 2-3 es pot veure com la longitud dels blocs d'alumini no sobresurt excessivament de les mordasses.

Un cop es tenen els blocs d'alumini, es fa una operació de planejat per tal que la superfície sigui completament plana. Aquesta operació és important, i comporta un temps de l'experimentació bastant elevat, ja que, per aprofitar material, es fan servir els mateixos blocs per seguir amb l'experimentació fins que tenen un gruix inferior a 1cm.



Figura 2-3. Taula de treball del centre de mecanitzat.

Amb el bloc acollat a la mordassa, i amb la superfície plana, es realitzen les ranures. Al tractar-se d'un procés repetitiu, s'ha creat, mitjançant codi de programació, un programa repetitiu que mecanitzi la ranura i desplaci l'eina per a la següent ranura. L'eina entra a la ranura amb pendent, perquè així es té una entrada al material progressiva.

A l'hora de fer els assaigs, amb el programa ja en marxa, s'ha d'aturar aquest cada vegada que es fa una ranura, ja que cal capturar les forces amb la taula dinamomètrica. Així doncs, mitjançant un programa informàtic, s'inicia l'adquisició de dades de la *Kistler* i alhora s'executa el programa del

centre de mecanitzat per així mecanitzar la ranura i capturar les dades de força de cadascuna de les ranures. A la Figura 2-4 es mostra l'ordinador que es troba connectat a la taula dinamomètrica *Kistler*. Per pantalla es mostra la interfície del programa *Daqview*. A sota el teclat, es mostra l'amplificador que converteix les dades recollides per al taula per tal de mostrar-les per pantalla i poder treballar-les.



Figura 2-4. Ordinador i amplificador per adquirir les forces de tall.

Un cop s'han mecanitzat totes les ranures possibles a la superfície del bloc, cal netejar el bloc per evitar falsejar les dades de rugositat. Per tant, cal anar amb cura i evitar ratllar la superfície. A més, als assaigs que s'utilitza refrigerant, cal assecar-lo.

Finalment, amb les ranures mecanitzades sobre el bloc, es pot mesurar la rugositat. A la Figura 2-5 es mostra una imatge del procés de medició de rugositat. Com que aquesta imatge correspon a l'experiment 12, a simple vista es poden apreciar les ondulacions de rugositat, ja que aquesta es troba al voltant dels $3\mu\text{m}$.



Figura 2-5. Imatge del capçal del rugosímetre durant la mesura de la rugositat.

No cal fer diferents mesures de rugositat al mateix punt per posteriorment fer una mitjana, ja que la lectura de rugositat en si ja és una mitjana de diferents valors al llarg d'una longitud recorreguda pel rugosímetre. A més, al fer mesures cada poc espai mecanitzat, es pot detectar una dada anòmla fàcilment.

Finalment, un cop mesurades totes les ranures, es torna a portar el bloc al centre de mecanitzat i es planeja de nou la superfície per tornar a repetir el mateix procediment.

3 Resultats

A la Taula 3-1 es mostra un resum dels experiments i els resultats obtinguts, en la qual s'aprecia els paràmetres que tenen en comú els diferents experiments.

Diàmetre [mm]	Velocitat de gir [rpm]	Avanç per dent [mm/dent]	Avanç lineal [m/min]	Sistema de lubricació	Longitud recorreguda [mm]	Rugositat Superficial [μm]	Estat de l'eina
6	12000	0,0417	1000	Sec	16160	0,6 - 0,7	4
				Esprai	34400	0,7 - 0,8	2
				Oli de tall	34800	0,6 - 0,7	2
		0,083	2000	Sec	2800	0,9 - 1,0	5
				Esprai	11600	0,8 - 0,9	3
				Oli de tall	13500	0,7 - 0,9	2
16	4500	0,083	750	Sec	13260	0,4 - 0,5	2
				Esprai	25160	1,3 - 1,8	1
				Oli de tall	25440	1,5 - 1,9	1
		0,167	1500	Sec	11920	1,3 - 1,5	2
				Esprai	25080	1,6 - 1,8	1
				Oli de tall	24720	2,7 - 3,0	1

Taula 3-1. Resum dels diferents experiments.

L'estat de l'eina, que es valora segons el desgast observat a l'eina un cop acabada l'experimentació, es quantifica amb valors de 1 a 5. La correspondència entre els números i l'estat es mostra a la Taula 3-2.

Estat de l'eina	Número
Pràcticament nova	1
Poc gastada	2
Gastada	3
Molt gastada	4
Malmesa	5

Taula 3-2. Valoració de l'estat de l'eina.

El conjunt d'experiments de la Taula 3-1 s'estructura amb quatre grups principals per comparar els sistemes de lubricació. Els tres assaigs de cada grup comparteixen les mateixes condicions de tall.

A part, es poden comparar els experiments amb eines de diferent diàmetre que mantenen la mateixa relació d'avanç per dent, i també observar com afecta l'augment o disminució de la velocitat d'avanç, que és directament proporcional a l'avanç per dent.

3.1 Experiment 1

3.1.1 Rugositat superficial

A la Figura 3-1-1 es mostra com varia la rugositat a mesura que l'eina es va gastant. La tendència de la rugositat, tot i que les dades reals difereixen d'aquesta línia de tendència, és de baixar lleugerament fins a arribar a un punt on l'eina ja no mecanitza bé. El valor d'aquesta es troba entre els $0.7\mu\text{m}$ i els $0.8\mu\text{m}$.

Es veu com la rugositat, al voltant dels 2600mm recorreguts augmenta sobtadament. Durant l'experimentació s'ha observat com en aquest punt, l'eina deixa d'arrencar el material formant la ferritja, la qual queda enganxada als laterals de la ranura.

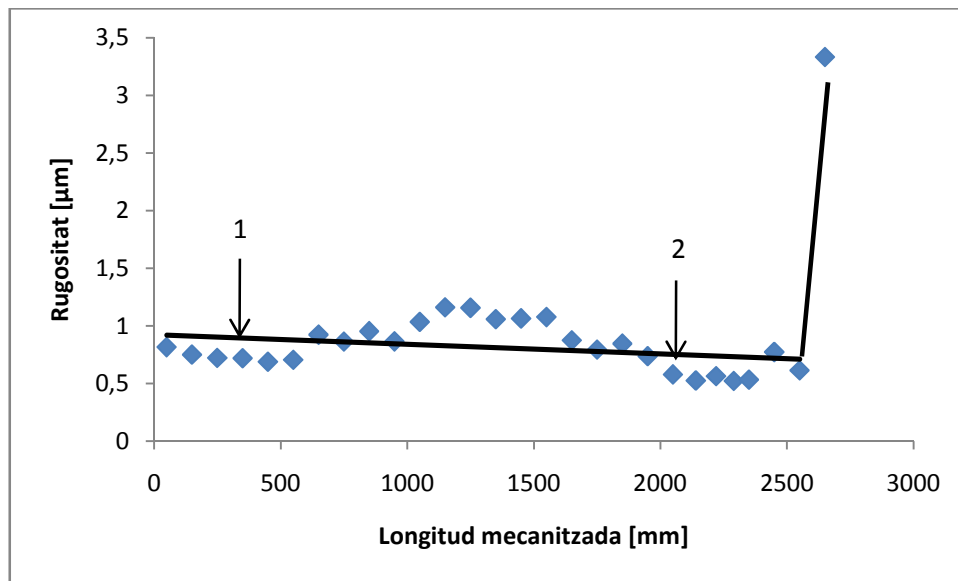


Figura 3-1-1. Rugositat al llarg de la longitud mecanitzada de l'eina 1.

L'augment de la rugositat es produeix de forma sobtada. Aquest fet només s'ha produït treballant sense refrigerant i amb condicions de tall properes a les màximes aconsellades pel fabricant. Els punts 1 i 2 assenyalats a la Figura 3-1-1 són els perfils de rugositat representats a la Figura 3-1-2 i Figura 3-1-3 respectivament.

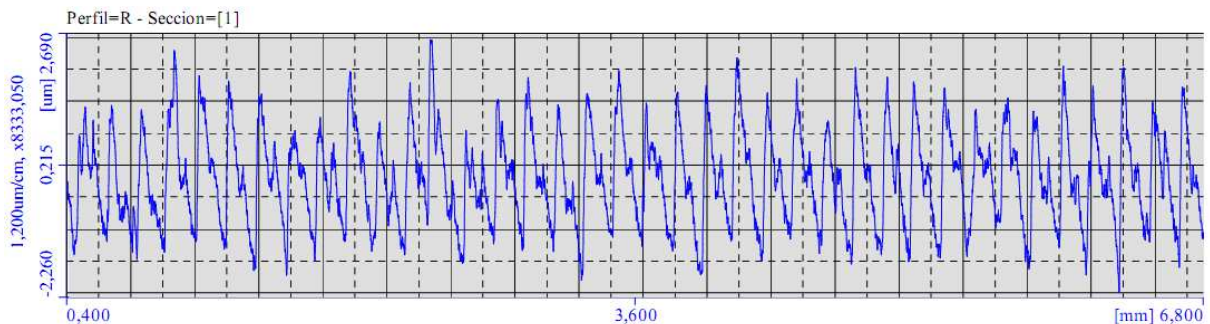


Figura 3-1-2. Perfil de rugositat del punt 1.

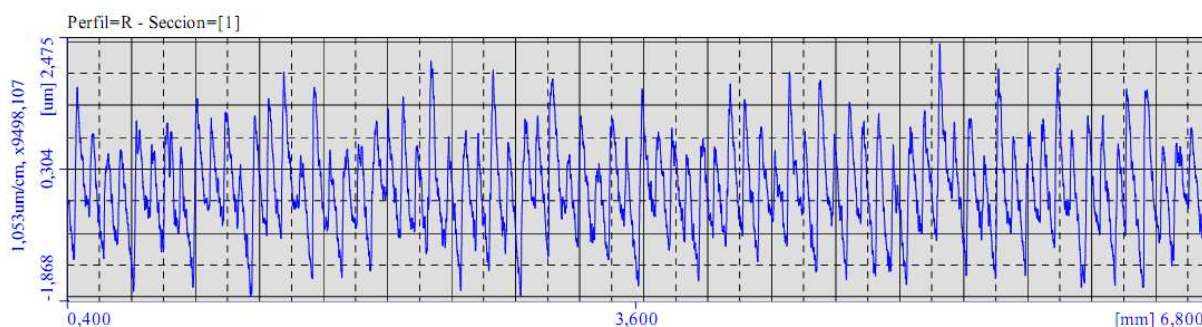


Figura 3-1-3. Perfil de rugositat del punt 2.

Els dos perfils de rugositat no mostren pics de rugositat puntuals gaire elevats respecte la resta. En el perfil del punt 2, si que es veuen pics lleugerament més alts, tot i que a simple vista no s'aprecien imperfeccions.

3.1.2 Forces de tall

Al ser la primera experimentació, i degut a la curta vida de l'eina, es tenen pocs punts de força, ja que durant les primeres ranures no es van mesurar. No obstant, a la Figura 3-1-4 es pot veure clarament que la força mitjana es troba entre els 15N i els 30N, creixent a més del doble quan l'eina deixa de treballar correctament. Aquest últim punt de la figura coincideix amb l'últim punt de rugositat, que alhora correspon al moment on l'eina deixa de treballar correctament.

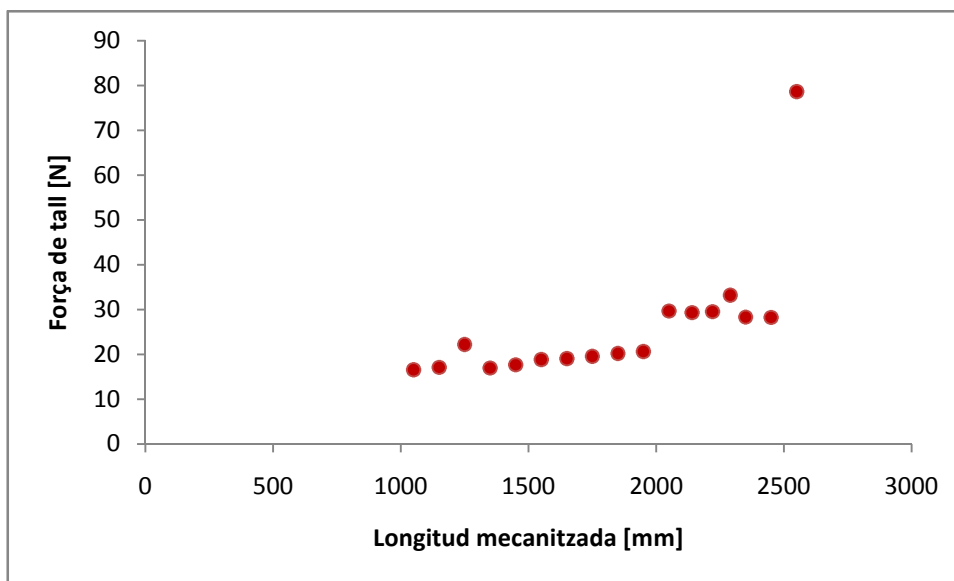


Figura 3-1-4. Força mitjana al llarg de la longitud mecanitzada de l'eina 1.

3.1.3 Estat de l'eina

A la Figura 3-1-5 es mostra l'estat de l'eina després de 2700mm recorreguts. Es pot veure com el fil de tall es troba totalment malmès. Als punts exteriors de l'eina, el fil de tall es veu trencat, igual que a la zona central. La resta de fil de tall, es veu poc afilat.



Figura 3-1-5. Imatge de l'eina 1 després de la mecanització.

Pel que fa a la cara de desprendiment de l'eina, s'hi aprecien unes osques. Aquestes osques s'han format perquè la ferritja quedava enganxada al bloc de material, i tocava en aquest punt de l'eina, fent-les més visibles.

A simple vista ja es veu que l'eina està malmesa. Si a més es veu el salt produït a la rugositat i la força de tall, es pot dir que aquesta eina ha arribat al final de la seva vida.

3.2 Experiment 2

3.2.1 Rugositat superficial

La tendència de la rugositat, com es veu a la Figura 3-2-1, és d'augmentar a mesura que es gasta l'eina. En un principi es tenen valors de rugositat al voltant dels $0.9\mu\text{m}$, per baixar al cap de pocs mil·límetres recorreguts. Aquesta es manté constant prop dels $0.7\mu\text{m}$ fins als 10000mm , on s'observa un augment per arribar a valors superiors a la rugositat inicial.

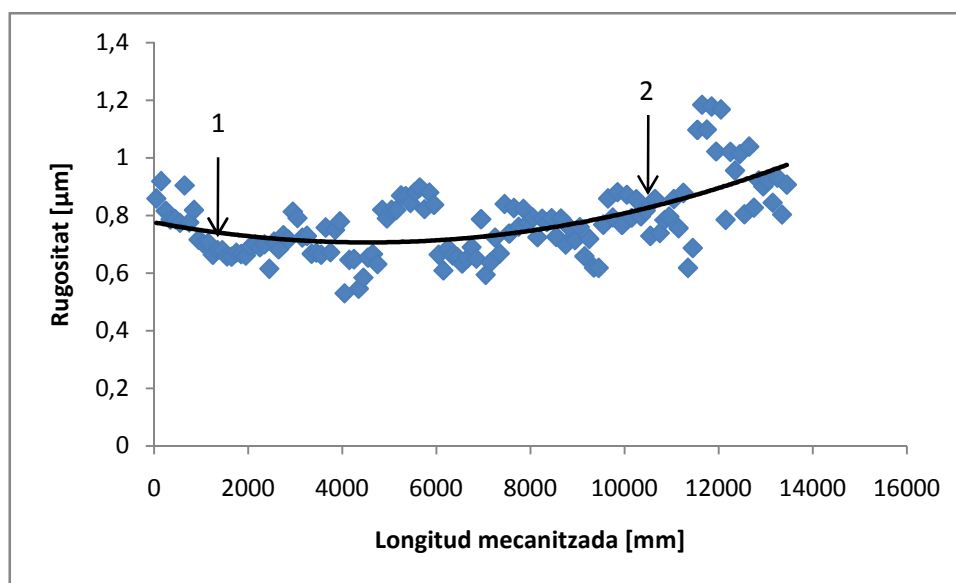


Figura 3-2-1. Rugositat al llarg de la longitud mecanitzada de l'eina 2.

S'ha aproximat la tendència amb una equació de segon ordre, per tal de mostrar un petit descens de la rugositat al principi i l'augment més pronunciat del final. Cal remarcar que la tendència només és vàlida fins a la longitud experimentada, ja que no se sap si a continuació la rugositat es manté, augmenta o disminueix.

Els punts ressaltats a la Figura 3-2-1 es mostren a la Figura 3-2-2 i la Figura 3-2-3 respectivament.

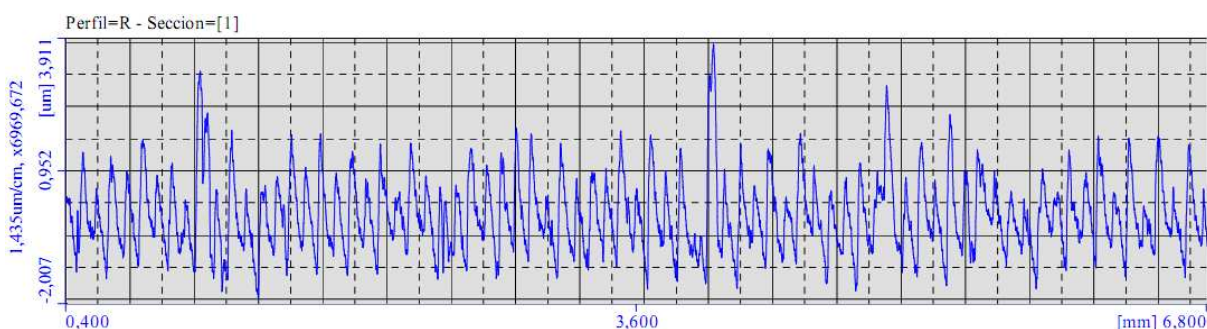


Figura 3-2-2. Perfil de rugositat del punt 1.

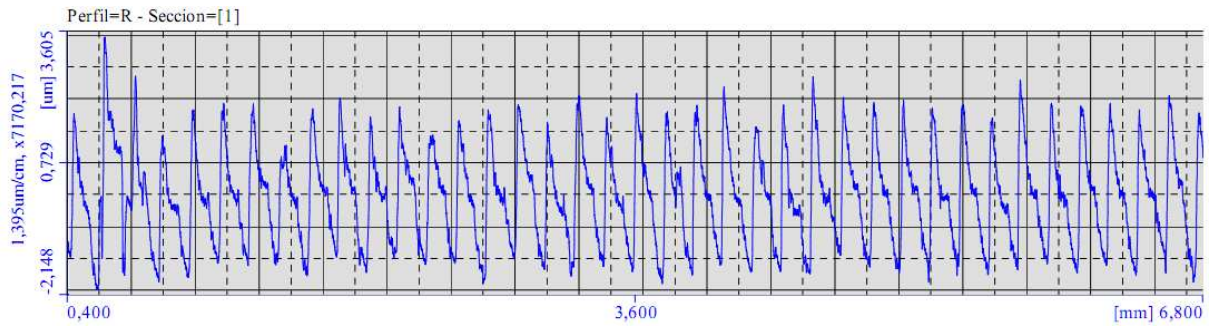


Figura 3-2-3. Perfil de rugositat del punt 2.

La principal diferència entre els punts 1 i 2 és que al punt 2, els pics i les valls es troben més separats que en el punt 1. L'amplitud d'aquests és similar a la del punt 1, però com que al punt 1 les hi ha més oscil·lacions però de menor amplitud, el valor de la rugositat mitjana augmenta.

3.2.2 Forces de tall

La força de tall, mostrada a la Figura 3-2-4, es troba entre els 10N i els 25N. Als últims punts experimentats, la força augmenta significativament, fins als 35N.

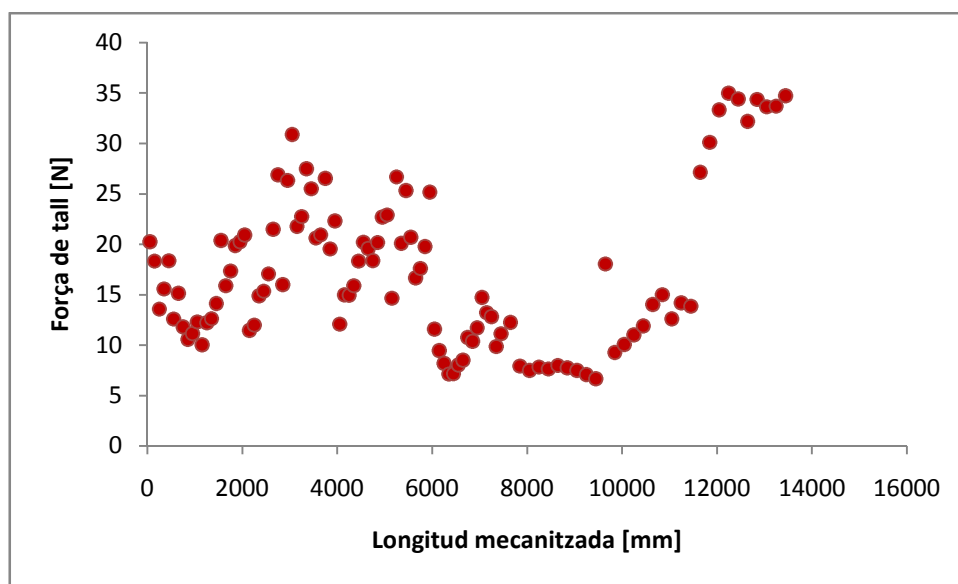


Figura 3-2-4. Força mitjana al llarg de la longitud mecanitzada de l'eina 2.

3.2.3 Estat de l'eina

A la Figura 3-2-5 es veu l'estat de l'eina utilitzada per fer l'experiment 2. S'aprecia un desgast del fil de tall a la zona central de l'eina. La zona externa del fil de tall no es veu gastada ni tampoc presenta osques.

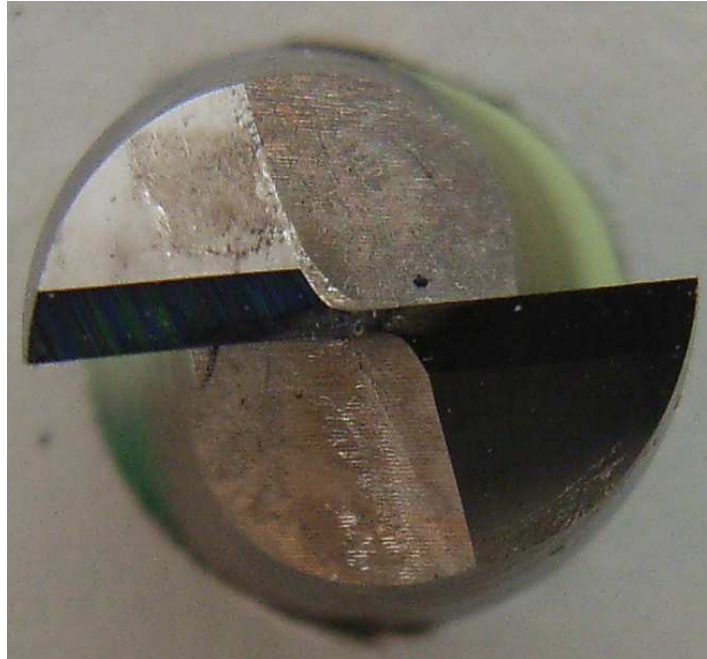


Figura 3-2-5. Imatge de l'eina 2 després de la mecanització.

3.3 Experiment 3

3.3.1 Rugositat superficial

La Figura 3-3-1 mostra l'evolució de la rugositat en funció de la longitud mecanitzada amb les condicions de tall corresponents a l'experiment 3.

En aquest cas, la tendència mostra un lleuger increment de la rugositat a mesura que s'incrementa la longitud mecanitzada, tot i que no varia gaire. Aquesta rugositat varia entre els $0.4\mu\text{m}$ al principi de l'experiment i els $0.5\mu\text{m}$ al final.

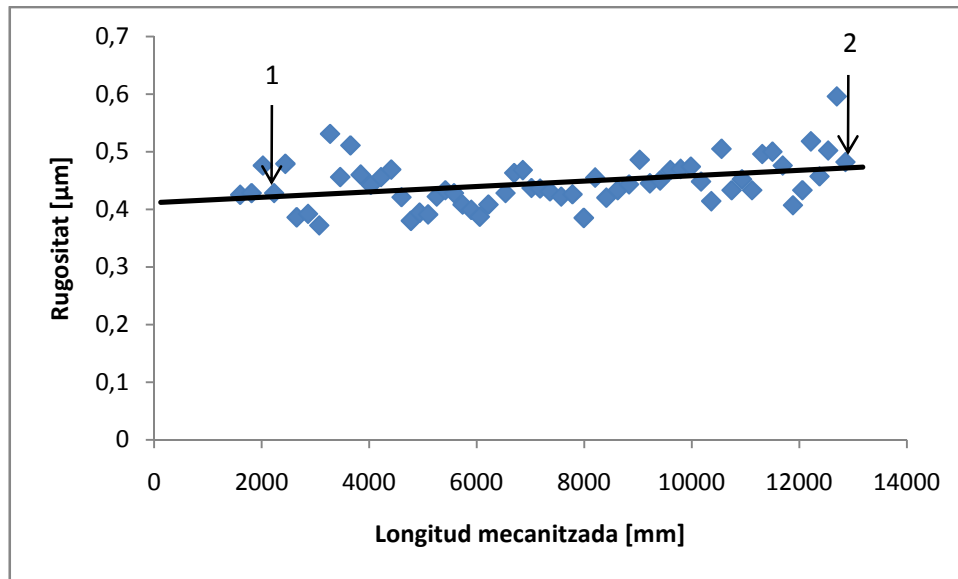


Figura 3-3-1. Rugositat al llarg de la longitud mecanitzada de l'eina 3.

La rugositat no creix significativament, però es pot observar com als últims punts de la Figura 3-3-1 es troben valors més elevats. Amb aquesta longitud mecanitzada, comencen a aparèixer algunes imperfeccions a la superfície.

A la Figura 3-3-2 i la Figura 3-3-3 es mostren els punts 1 i 2 assenyalats a la gràfica de la rugositat.

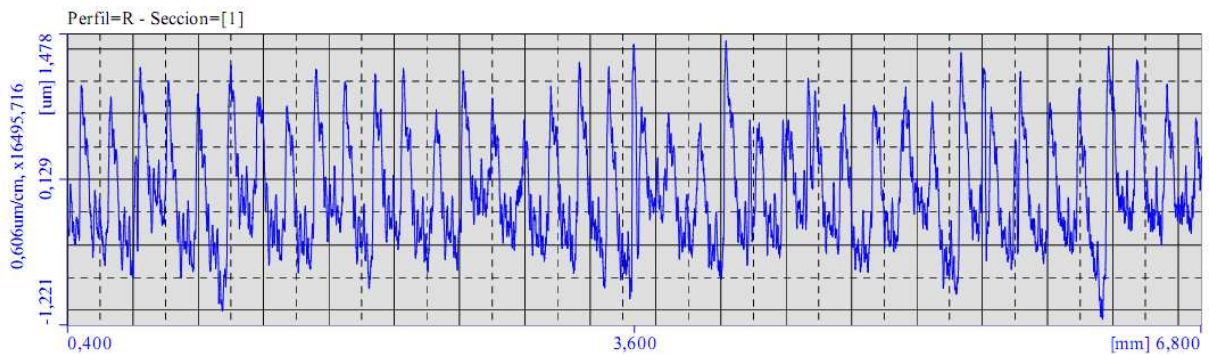


Figura 3-3-2. Perfil de rugositat del punt 1.

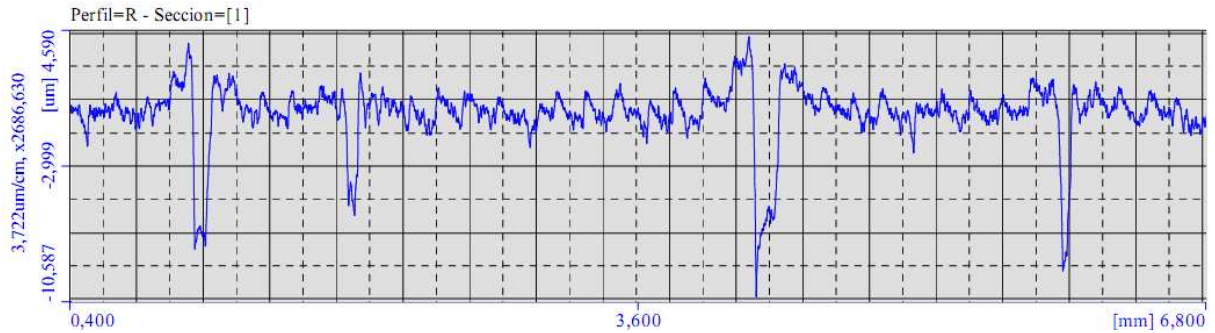


Figura 3-3-3. Perfil de rugositat del punts 2.

Entre els punts 1 i 2 s'evidencia que en el punt 2, comencen a apareixes imperfeccions, ja que es veuen quatre valls que destaquen de la resta de pics i valls de la mesura. Aquestes són perceptibles a simple vista. Tot i això, la rugositat superficial no augmenta significativament.

3.3.2 Forces de tall

La força de tall, representada a la Figura 3-3-4, mostra un conjunt de valors, la majoria dels quals es troben compresos entre els 10N i els 30N.

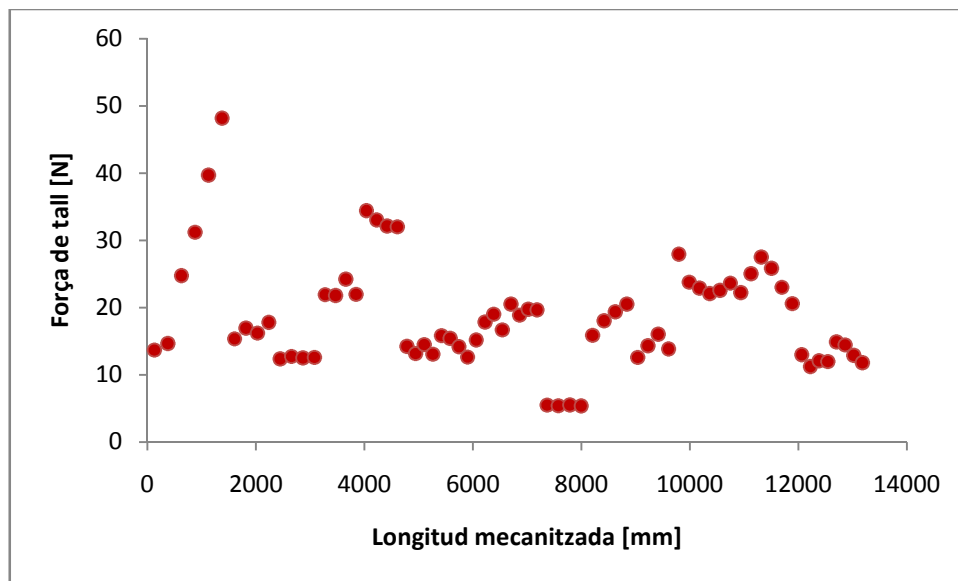


Figura 3-3-4. Força mitjana al llarg de la longitud mecanitzada de l'eina 3.

3.3.3 Estat de l'eina

La Figura 3-3-5 mostra l'estat de l'eina un cop realitzat l'experiment en qüestió. Es pot observar un desgast del fil de tall al centre de l'eina, mentre que la resta del fil de tall es manté en bon estat.

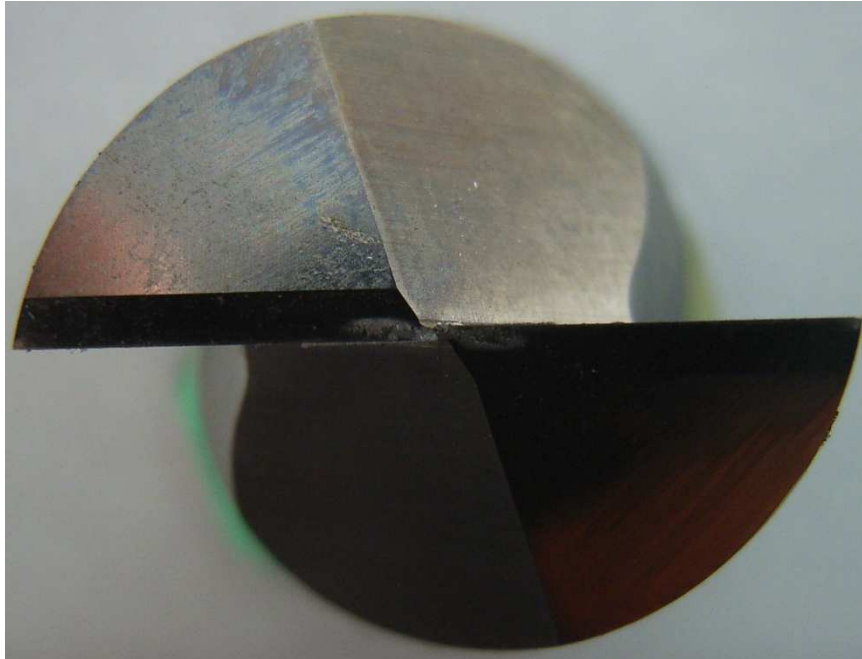


Figura 3-3-5. Estat de l'eina després de l'experiment 3.

3.4 Experiment 4

3.4.1 Rugositat superficial

A la Figura 3-4-1 es mostra l'evolució de la rugositat a mesura que es mecanitza amb l'eina 4. La tendència d'aquest experiment és d'un descens, però no de forma lineal. En un tram inicial, on la rugositat se situa prop dels $2\mu\text{m}$, i aproximadament fins als 12000mm mecanitzats, hi ha un descens de la rugositat, per posteriorment establir-se a valors propers als $1.5\mu\text{m}$.

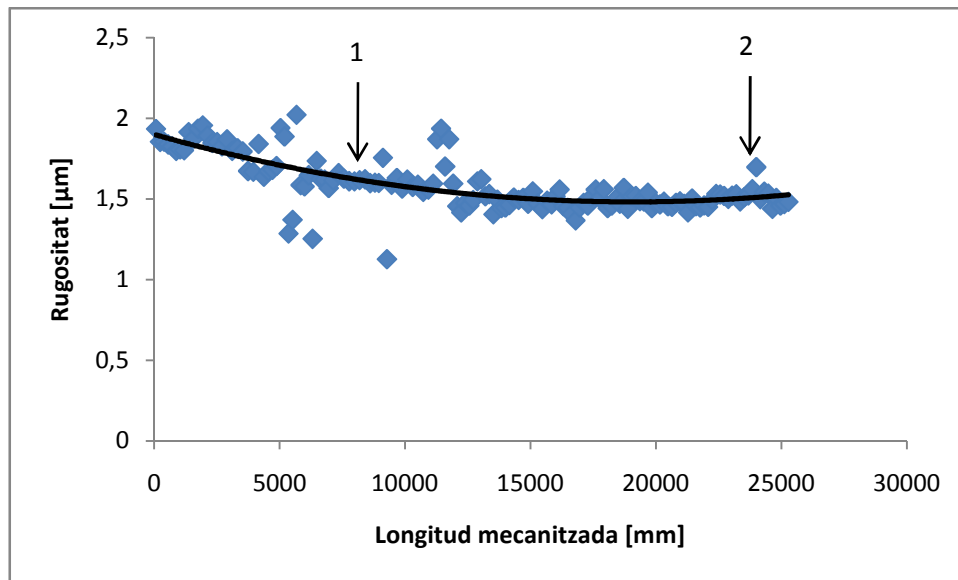


Figura 3-4-1. Rugositat al llarg de la longitud mecanitzada de l'eina 4.

Els punts indicats a la Figura 3-4-1 es mostren a la Figura 3-4-2 i Figura 3-4-3 respectivament. El punt 1 es mostra un conjunt de pics i valls uniforme, mentre que al punt 2, es veu un perfil de rugositat estrany.

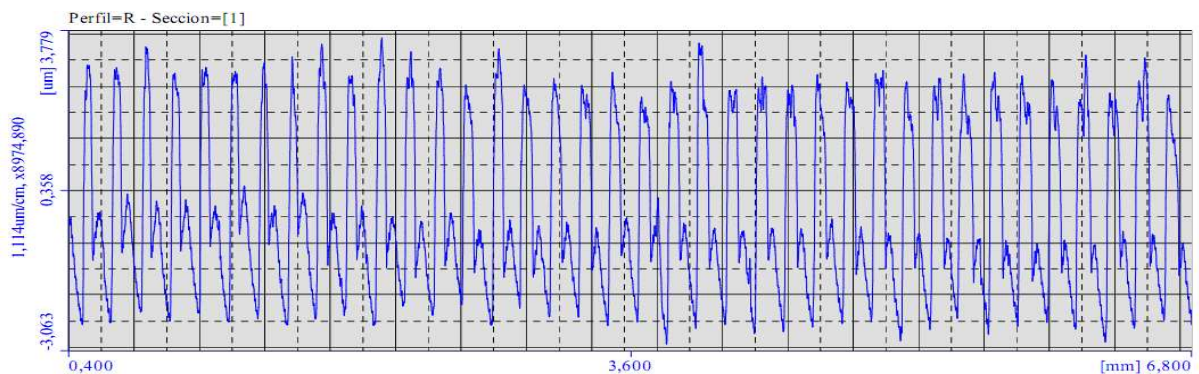


Figura 3-4-2. Perfil de rugositat del punt 1.

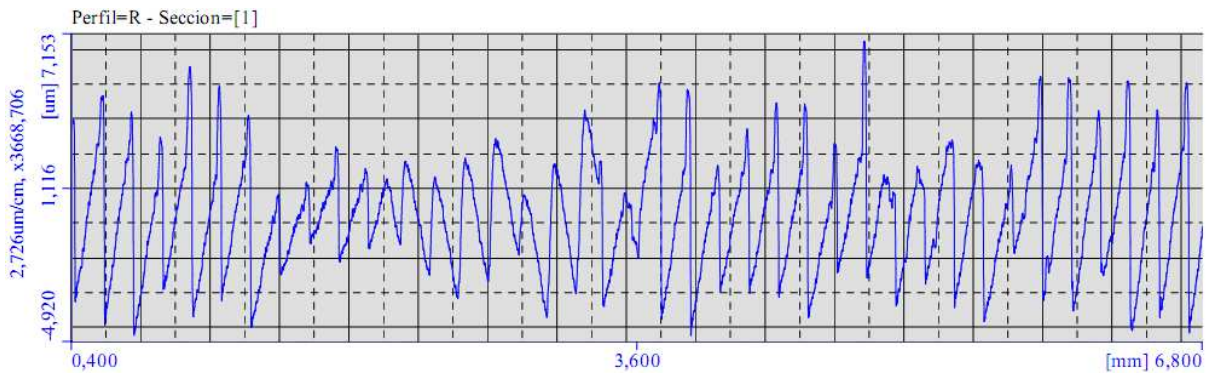


Figura 3-4-3. Perfil de rugositat del punt 2.

De la Figura 3-4-3 es pot extreure que la rugositat varia significativament amb poc espai, tot i que es manté per sota de la inicial. Es pot apreciar que en aquesta figura, els pics de rugositat es troben com aixafats a la punta.

3.4.2 Forces de tall

A la Figura 3-4-4 es mostra la força de tall de l'experiment 4. Els valors de força se situen entre els 5N i els 25N.

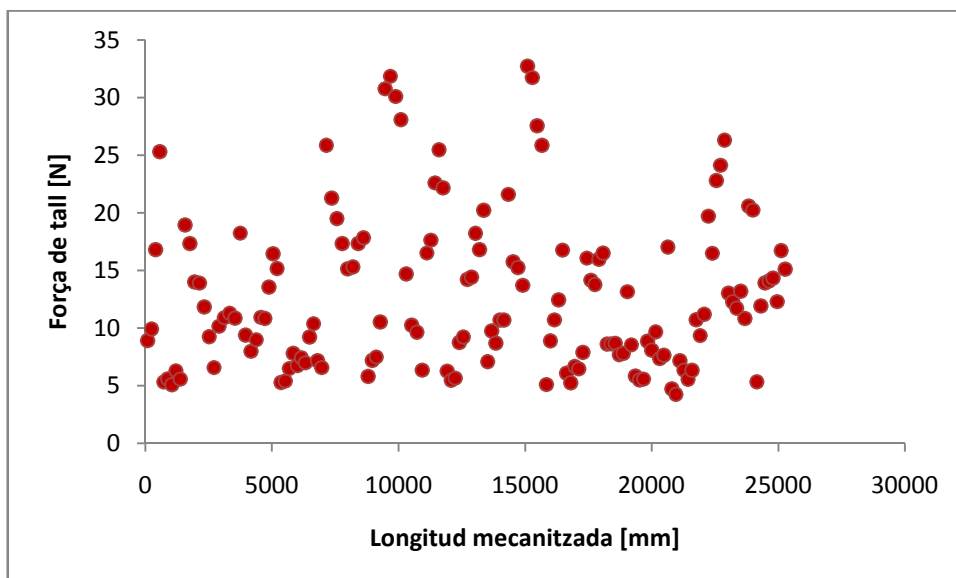


Figura 3-4-4. Força mitjana al llarg de la longitud mecanitzada de l'eina 4.

3.4.3 Estat de l'eina

A la Figura 3-4-5 es mostra una imatge de l'eina que s'ha fet servir per l'experiment 4. En aquesta eina no s'observa cap imperfecció al fil de tall, només una mica de desgast, però no gaire. Les marques que es veuen a la cara de despreniment, són restes del lubricant utilitzat.

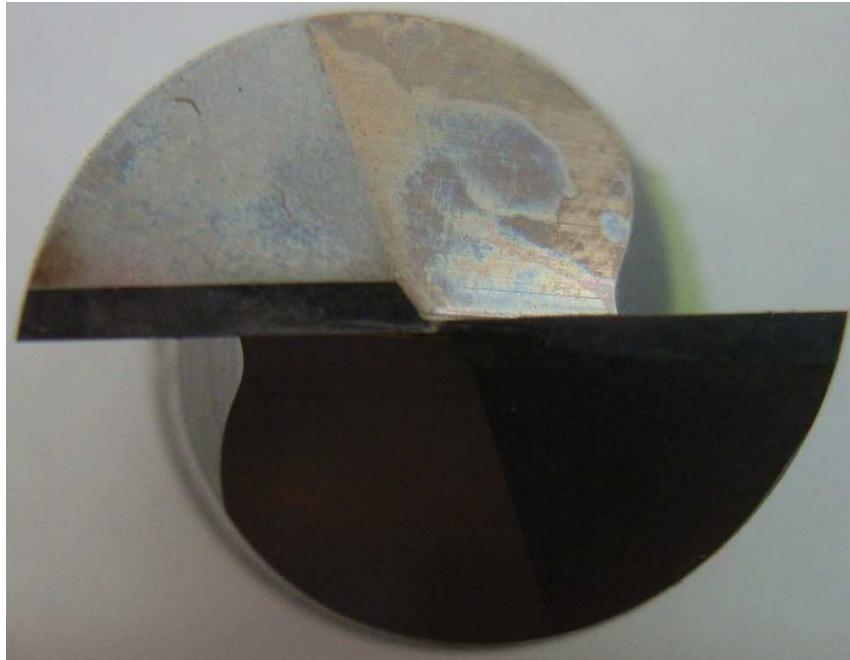


Figura 3-4-5. Estat de l'eina 4 després de l'experimentació.

3.5 Experiment 5

3.5.1 Rugositat superficial

A la Figura 3-5-1 es mostra l'evolució de la rugositat amb la longitud mecanitzada. En aquest cas, la tendència és de disminuir la rugositat a mesura que es gasta l'eina, tot i que en els primers mil·límetres recorreguts, aquesta es manté constant.

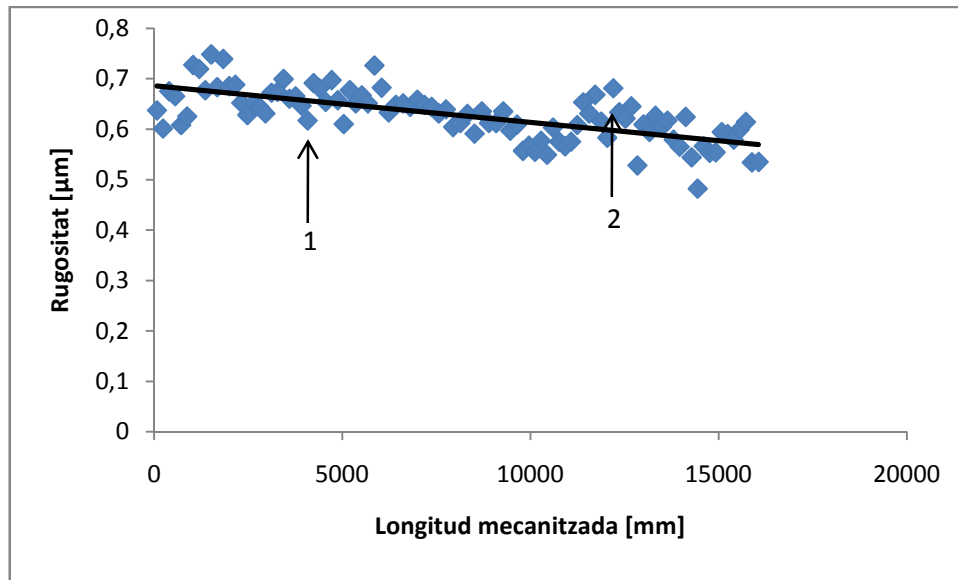


Figura 3-5-1. Rugositat al llarg de la longitud mecanitzada amb l'eina 5.

La rugositat al principi es troba al voltant dels $0.7\mu\text{m}$, per anar baixant fins a valors inferiors als $0.6\mu\text{m}$. Els punts 1 i 2 mostrats a la Figura 3-5-1 són els que es mostren a la Figura 3-5-2 i Figura 3-5-3.

Observant el perfil de rugositat del punt 1, es veuen els pic i les valls d'amplitud similar, tret d'un punt, on es nota una imperfecció.

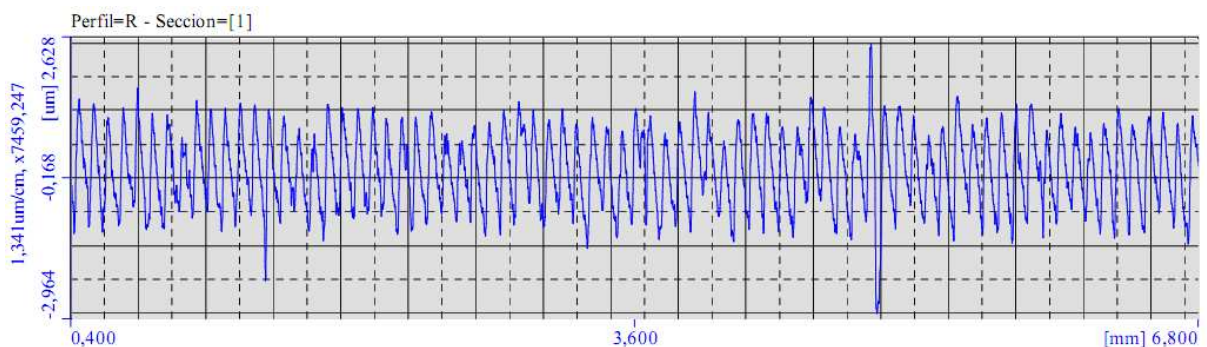


Figura 3-5-2. Perfil de rugositat del punt 1.

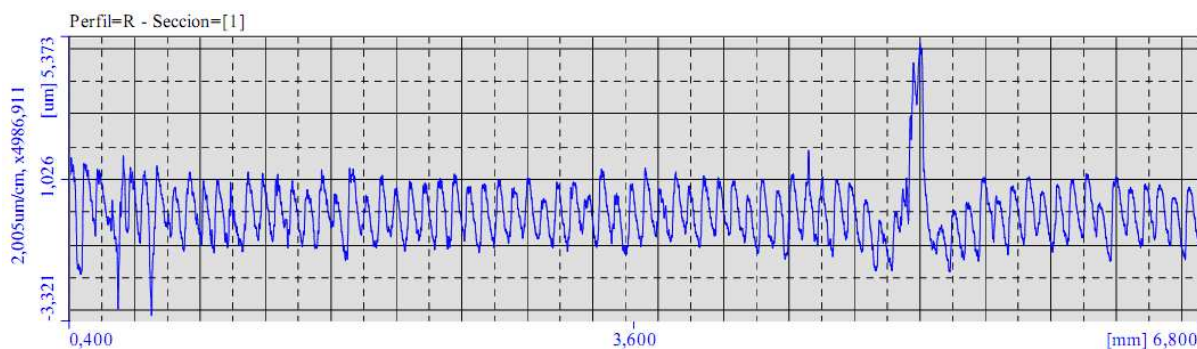


Figura 3-5-3. Perfil de rugositat del punt 2.

Al punt 2, Figura 3-5-3, s'observa un pic de rugositat molt més elevat que la resta, que representa una imperfecció a la superfície mecanitzada perceptible a simple vista. També es veuen un parell de valls que sobresurten de la resta. Amb aquesta longitud mecanitzada comencen a aparèixer imperfeccions a la superfície.

3.5.2 Forces de tall

A la Figura 3-5-4 es mostren les forces de tall de l'experiment 5. La majoria de punts es troben entre els 10N i els 15N, excepte un conjunt de punts que se situen per sobre els 20N.

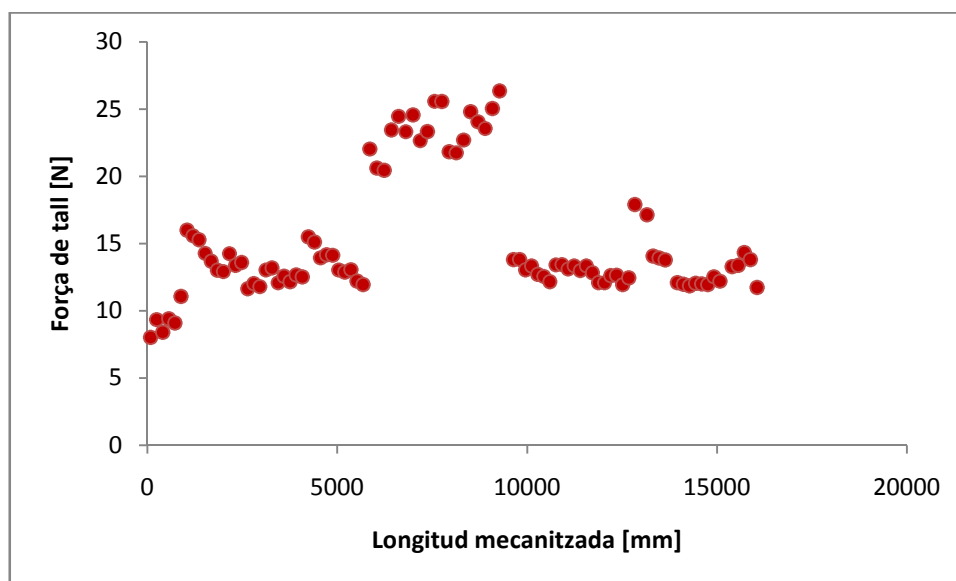


Figura 3-5-4. Força mitjana al llarg de la longitud mecanitzada de l'eina 5.

3.5.3 Estat de l'eina

A la Figura 3-5-5 es mostra l'eina utilitzada per l'experiment 5. Es pot observar un fil de tall força gastat. La zona externa de l'eina presenta unes petites osques, i es veu el fil de tall trencat. Pel que fa a la zona central, es pot veure el desgast, que ocupa gairebé la totalitat del fil de tall.



Figura 3-5-5. Imatge de l'eina 5 després de la mecanització.

A les cares d'incidència i de desprendiment, no s'hi aprecien imperfeccions, com si que succeïa amb l'eina utilitzada per l'experiment número 1, que també s'ha fet sense lubricant.

3.6 Experiment 6

3.6.1 Rugositat superficial

La rugositat, mostrada a la Figura 3-6-1, mostra una tendència a disminuir a mesura que augmenta la longitud mecanitzada. La rugositat inicial es situa al voltant dels $0.8\mu\text{m}$, per baixar fins a valors pròxims a $0.65\mu\text{m}$ quan s'han mecanitzat 34000mm.

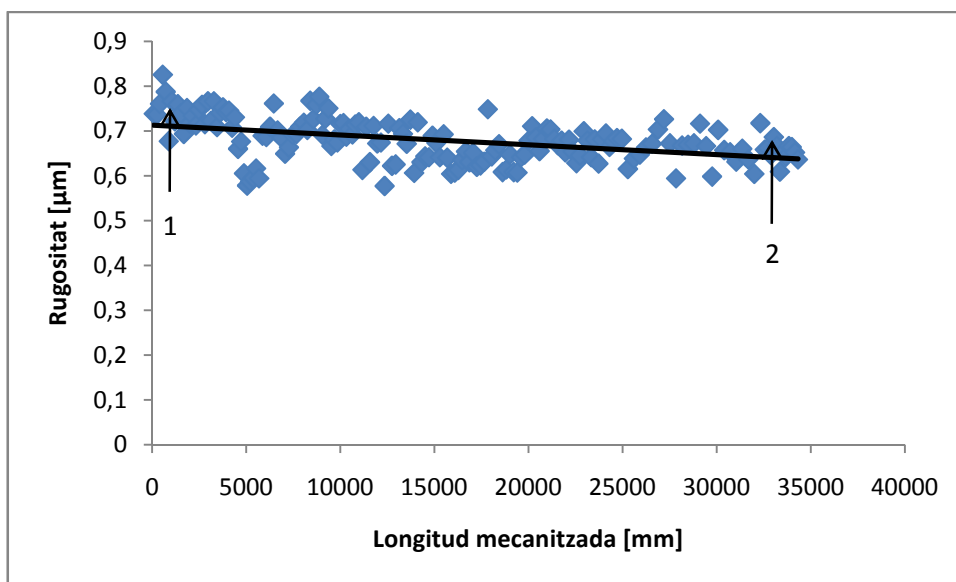


Figura 3-6-1. Rugositat al llarg de la longitud mecanitzada de l'eina 6.

La Figura 3-6-2 i la Figura 3-6-3 mostren els punts 1 i 2 assenyalats a la Figura 3-6-1. En els perfils representats, es pot observar com all corresponent al punt 2, apareixen imperfeccions, amb pics de rugositat bastant superiors a la mitjana.

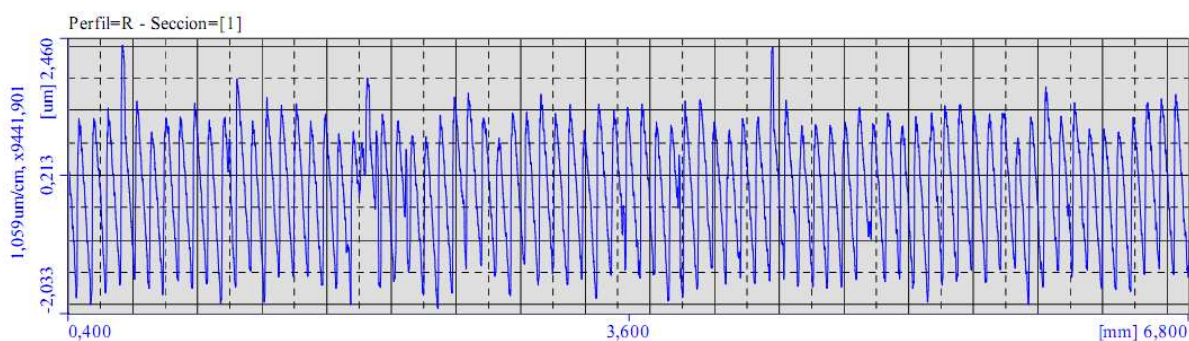


Figura 3-6-2. Perfil de rugositat del punt 1.

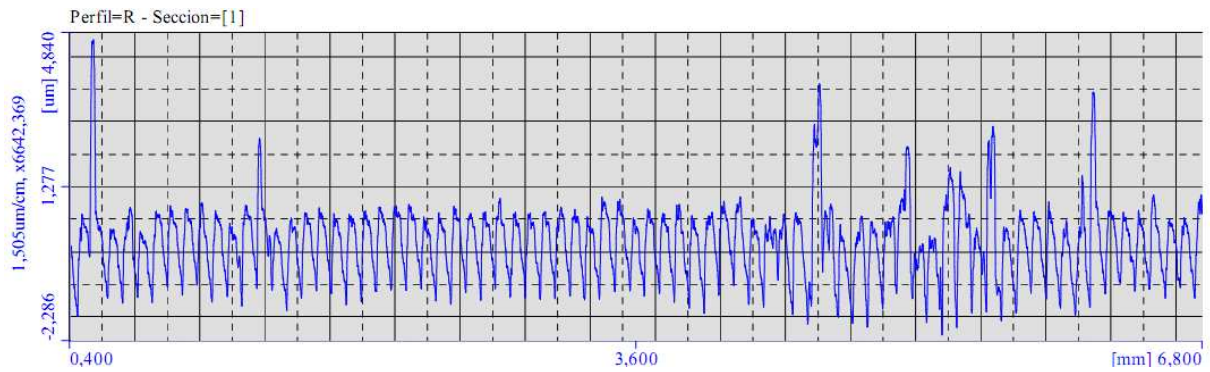


Figura 3-6-3. Perfil de rugositat del punt 2

L'aparició de les imperfeccions hauria de fer augmentar la rugositat, però si s'observen els pics de rugositat de la Figura 3-6-3 es pot observar que aquests es troben aixafats, sobretot si es comparen amb els pics de la Figura 3-6-2. És per això, que la rugositat global baixa lleugerament.

3.6.2 Forces de tall

A la Figura 3-6-4 es mostren les forces de tall de l'experiment 6. La majoria de punts es troben entre els 10N i 20N.

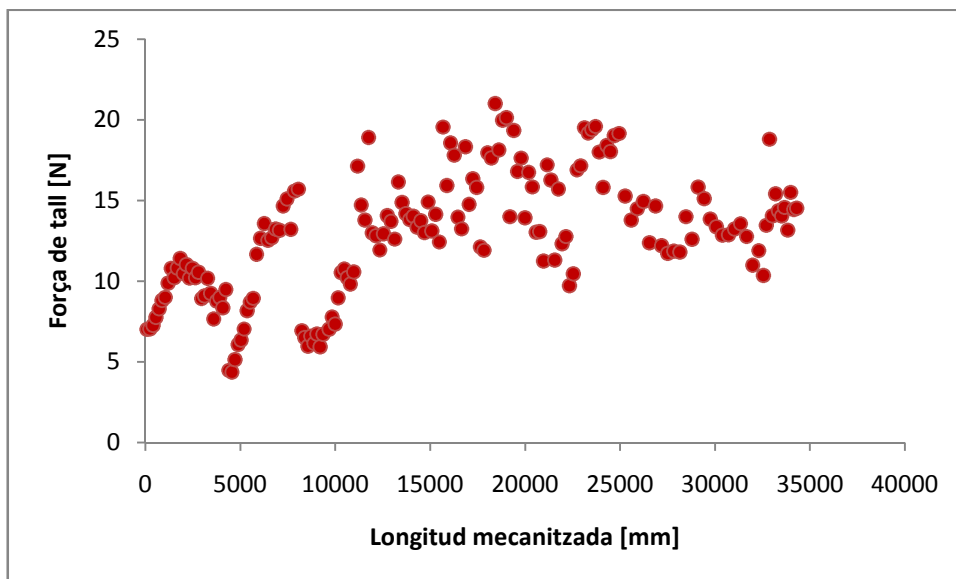


Figura 3-6-4. Força de tall al llarg de la longitud recorreguda de l'eina 6.

3.6.3 Estat de l'eina

A la Figura 3-6-5 es mostra l'eina que s'ha utilitzat per fer l'experiment 6. L'eina es troba en molt bon estat, només s'observa un lleuger desgast a la part central de l'eina, on sembla que el fil de tall no es troba completament afilat.

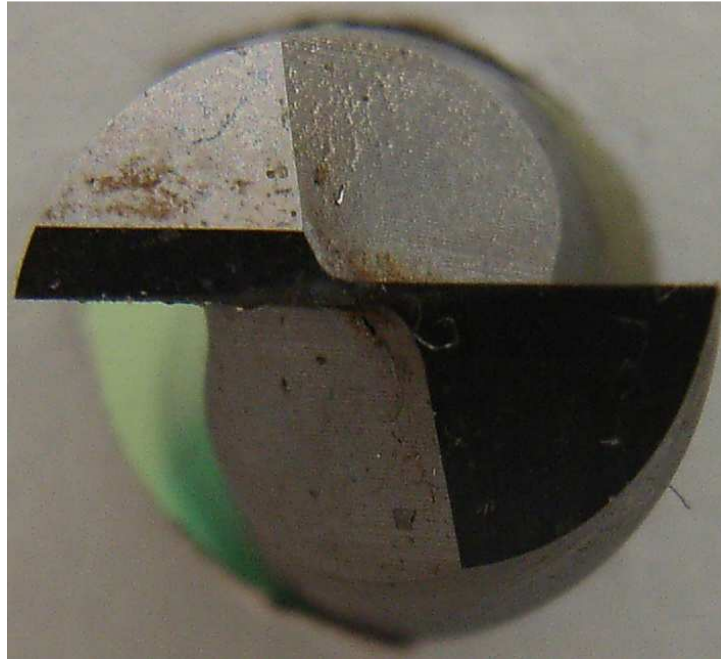


Figura 3-6-5. Estat de l'eina 6 després de mecanitzar.

Les ondulacions que s'aprecien al fil de tall, són petits fragments d'alumini que han quedat enganxats a l'eina per l'oli de tall utilitzat.

3.7 Experiment 7

3.7.1 Rugositat superficial

A la Figura 3-7-1 es mostra l'evolució de la rugositat amb la longitud mecanitzada. En aquest experiment, la rugositat es manté força constant al voltant dels $1.4\mu\text{m}$.

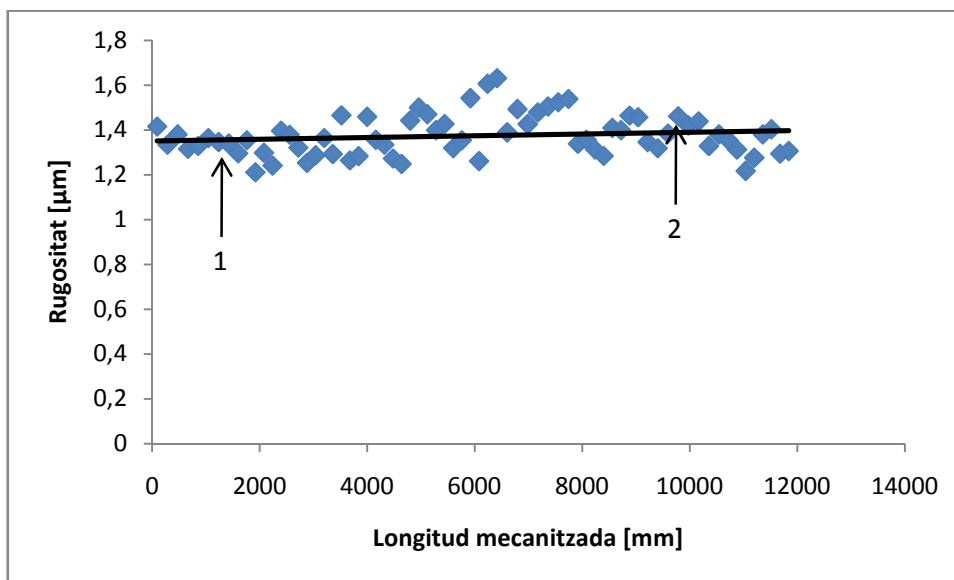


Figura 3-7-1. Rugositat al llarg de la longitud mecanitzada de l'eina 7.

Els punts 1 i 2 de la Figura 3-7-1 es mostren a la Figura 3-7-2 i a la Figura 3-7-3 respectivament. La principal diferència que s'aprecia és que en el punt 2, quan l'eina ha treballat més, els pics de rugositat es mostren més aixafats a la punta. A la Figura 3-7-3 també es veu algun pic molt més elevat.

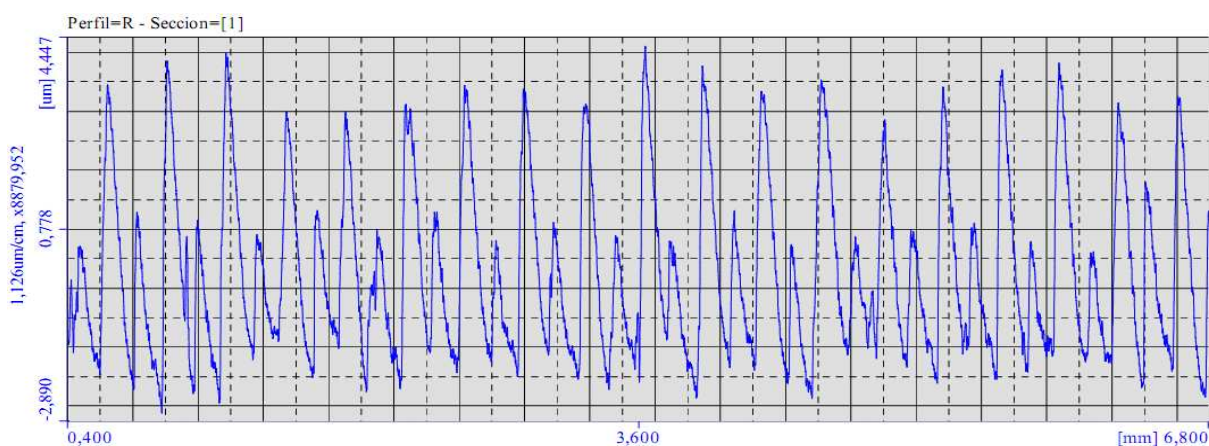


Figura 3-7-2. Perfil de rugositat del punt 1.

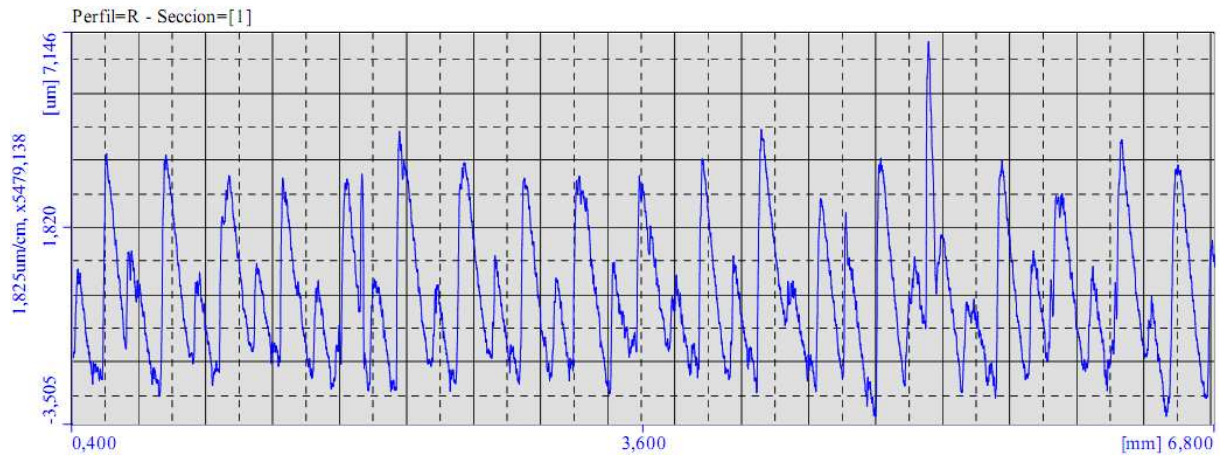


Figura 3-7-3. Perfil de rugositat del punt 2.

3.7.2 Forces de tall

La Figura 3-7-4 mostra les forces de tall de l'experiment 7. Aquestes es troben molt disperses, entre els 15N i els 60N.

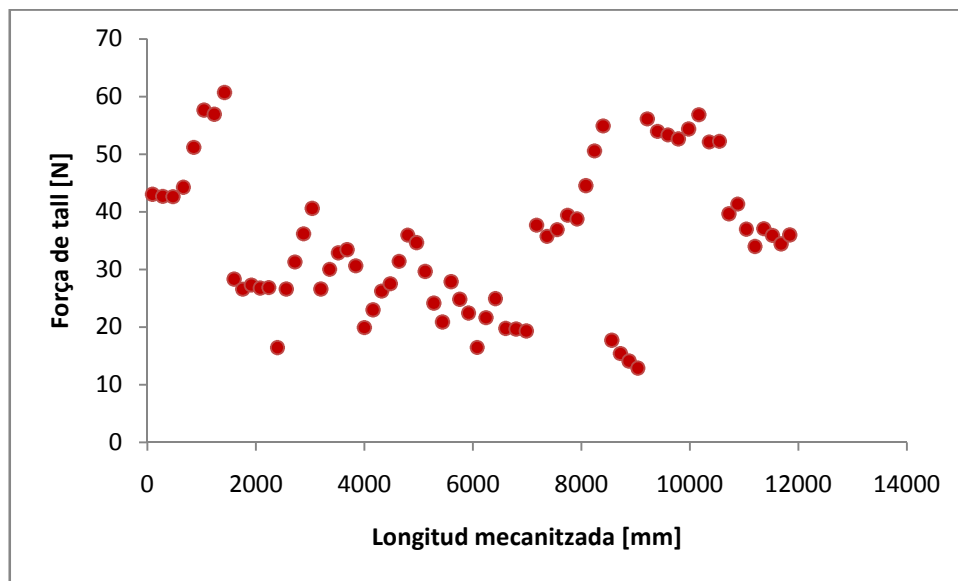


Figura 3-7-4. Força de tall al llarg de la longitud recorreguda de l'eina 7.

3.7.3 Estat de l'eina

A la Figura 3-7-5 es mostra una imatge de l'eina utilitzada per mecanitzar sota les condicions de tall de l'experiment 7. En aquesta imatge es pot veure un fil de tall bastant gastat, al centre de l'eina, i als extrems del fil de tall s'aprecia una petita ondulació.

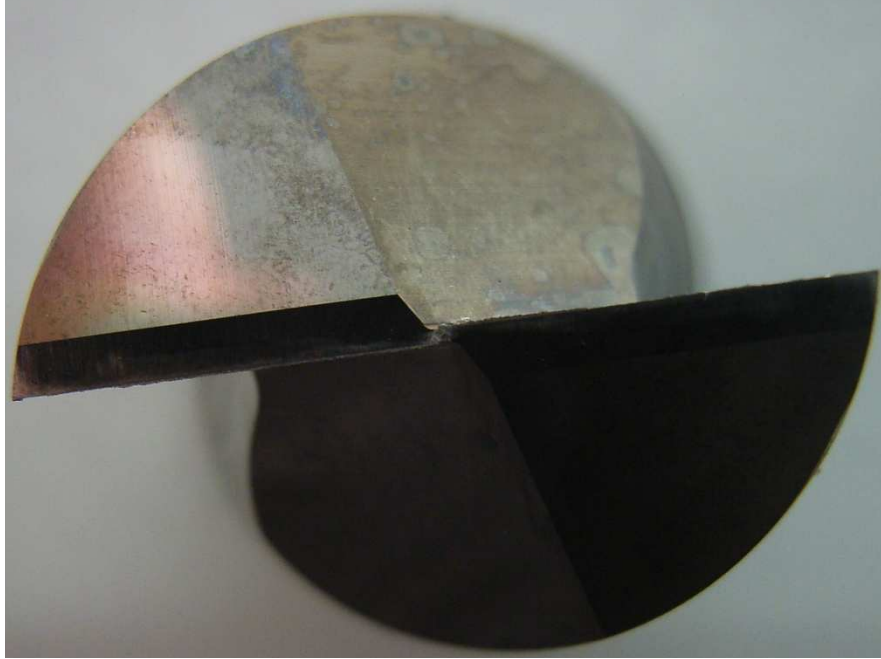


Figura 3-7-5. Estat de l'eina número 7 després de fer l'experimentació.

3.8 Experiment 8

3.8.1 Rugositat superficial

La Figura 3-8-1 mostra l'evolució de la rugositat amb la longitud mecanitzada. En aquest experiment, la rugositat inicial es troba al voltant dels $2.7\mu\text{m}$, i creix en un principi cap a valors per sobre els $3\mu\text{m}$, per mantenir-se constant a aquests valors fins als 25000mm mecanitzats.

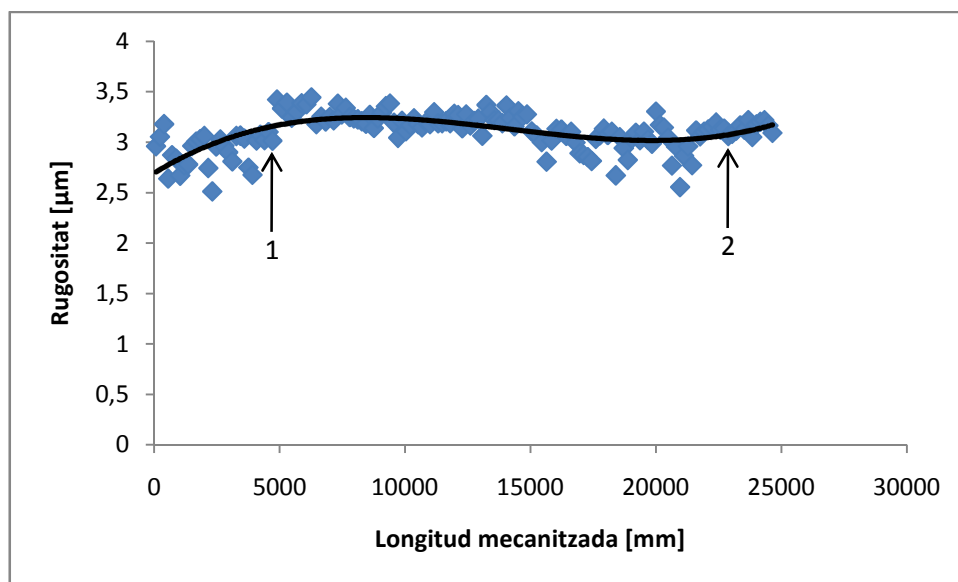


Figura 3-8-1. Rugositat al llarg de la longitud mecanitzada de l'eina 8.

Els punts 1 i 2 de la Figura 3-8-1 es mostren a la Figura 3-8-2 i a la Figura 3-8-3, que contenen les lectures del rugosímetre.

Es pot veure que el perfil del punt 1, els pics de la rugositat mostren una punta principal, i una altra de menys amplitud tot seguit, mentre que al punt 2, Figura 3-8-3, el perfil de rugositat només mostra un sol pic.

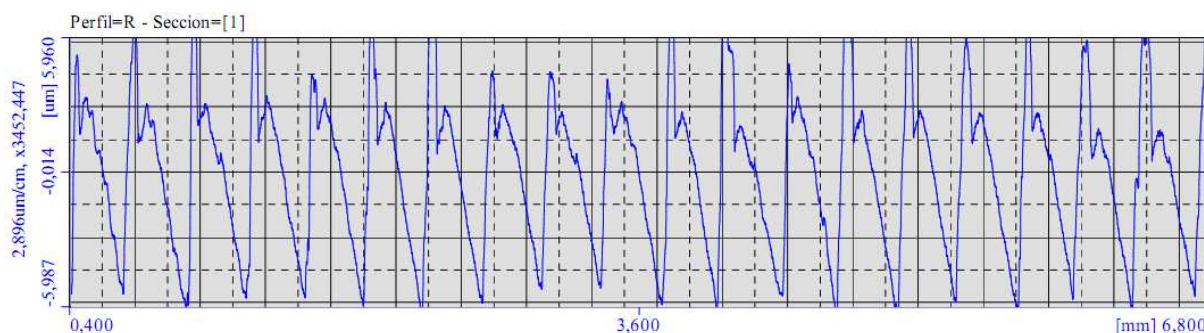


Figura 3-8-2. Perfil de rugositat del punt 1.

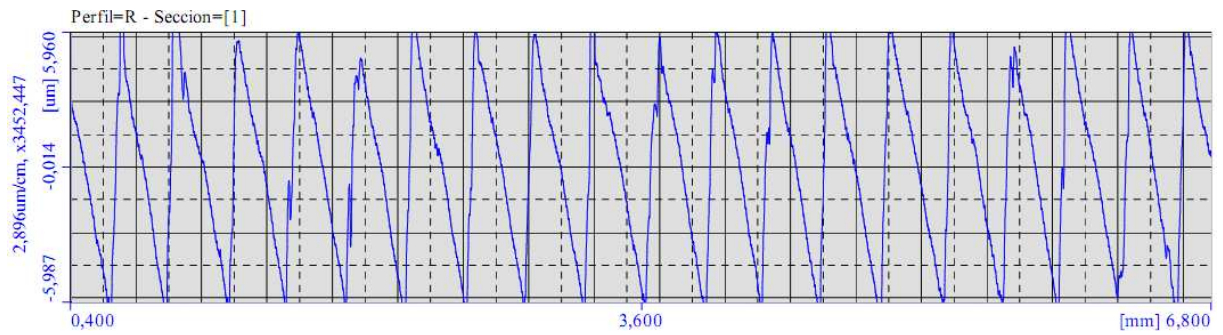


Figura 3-8-3. Perfil de rugositat del punt 2.

3.8.2 Forces de tall

A la Figura 3-8-4 es mostra el conjunt de les forces de tall de l'experiment 8. Aquesta força varia entre els 10N i els 35N.

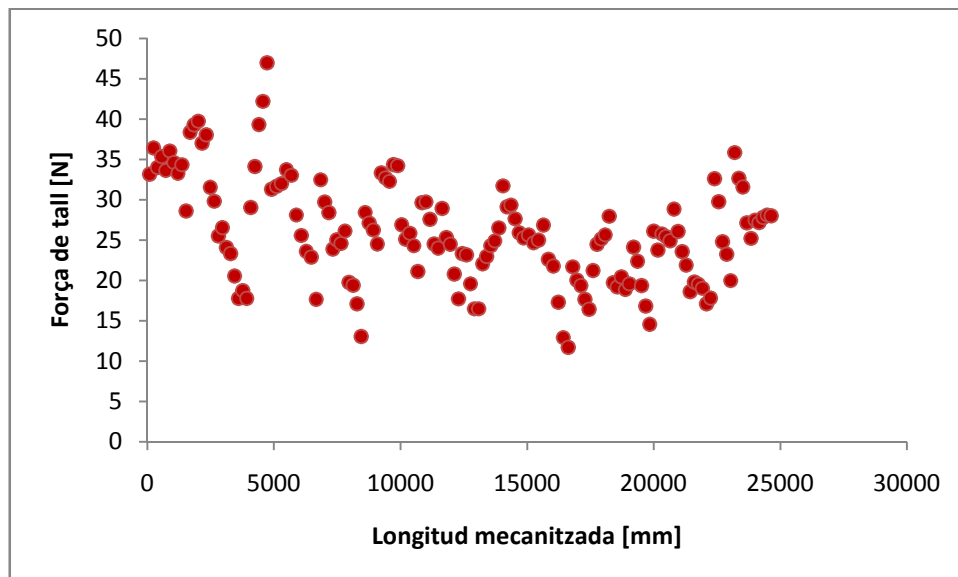


Figura 3-8-4. Força de tall al llarg de la longitud recorreguda de l'eina 8.

3.8.3 Estat de l'eina

A la Figura 3-8-5 es mostra una imatge de l'eina amb la qual s'ha fet l'experiment 9. Es pot apreciar que el fil de tall es troba en perfecte estat, tret dels punts centrals, on s'aprecia una mica de desgast. Tot i aquest desgast, l'eina es troba en bones condicions.



Figura 3-8-5. Imatge de l'eina després de l'experiment 8.

3.9 Experiment 9

3.9.1 Rugositat superficial

La Figura 3-9-1 mostra l'evolució de la rugositat en funció de la longitud mecanitzada. Aquest experiment, que arriba fins als 12000mm, presenta una tendència creixent de la rugositat, amb valors de $0.8\mu\text{m}$ al principi, i valors de $0.9\mu\text{m}$ al final.

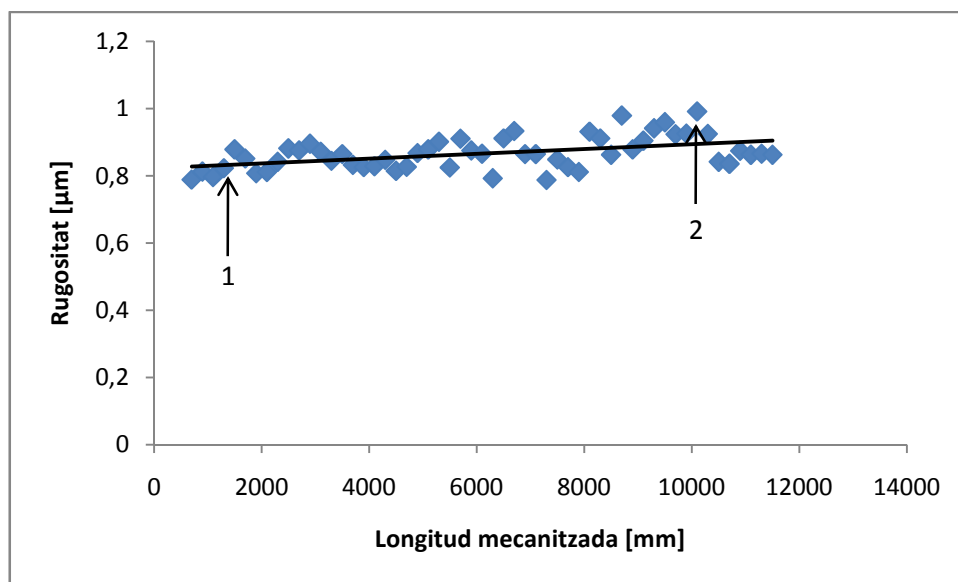


Figura 3-9-1. Rugositat al llarg de la longitud mecanitzada de l'eina 9.

La tendència s'ajusta bastant a una línia recta. Dels punts 1 i 2 de la Figura 3-9-1 se'n mostra la mesura del rugosímetre a la Figura 3-9-2 i Figura 3-9-3 respectivament.

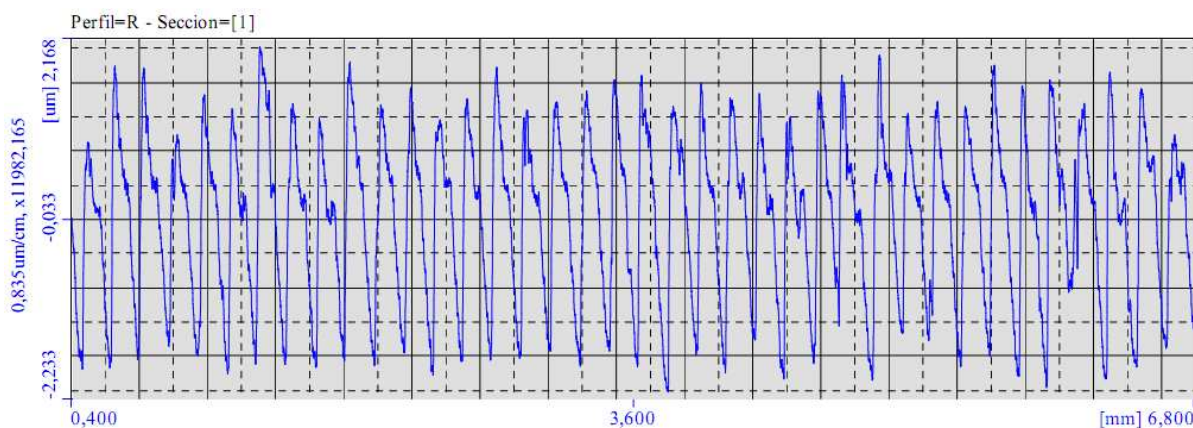


Figura 3-9-2. Perfil de rugositat del punt 1.

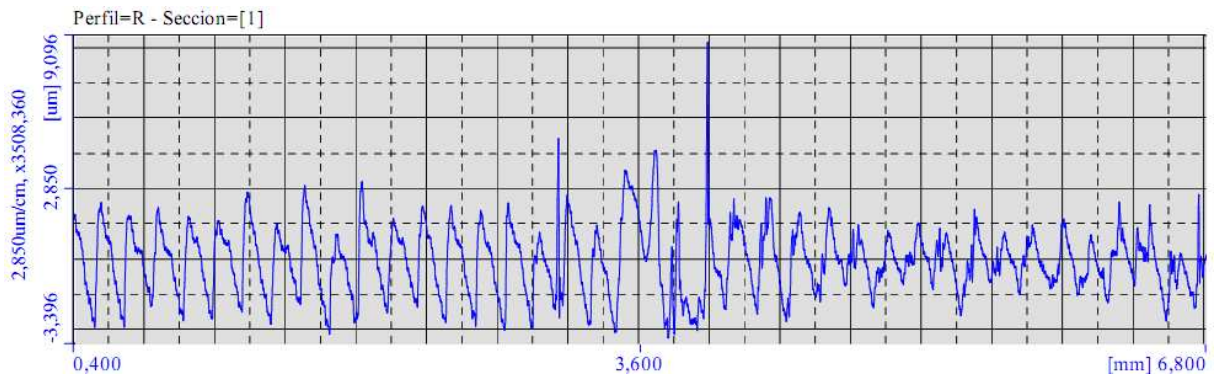


Figura 3-9-3. Perfil de rugositat del punt 2.

Es pot observar que al punt 2 apareixen imperfeccions just a la zona central del perfil mesurat, amb una vall força ampla seguida d'un pic molt més elevat que la resta. Aquestes es poden percebre a simple vista sobre la superfície mecanitzada.

3.9.2 Forces de tall

L'evolució de la força de tall es mostra a la Figura 3-9-4. Els valors d'aquesta força oscil·len entre els 10N i els 30N.

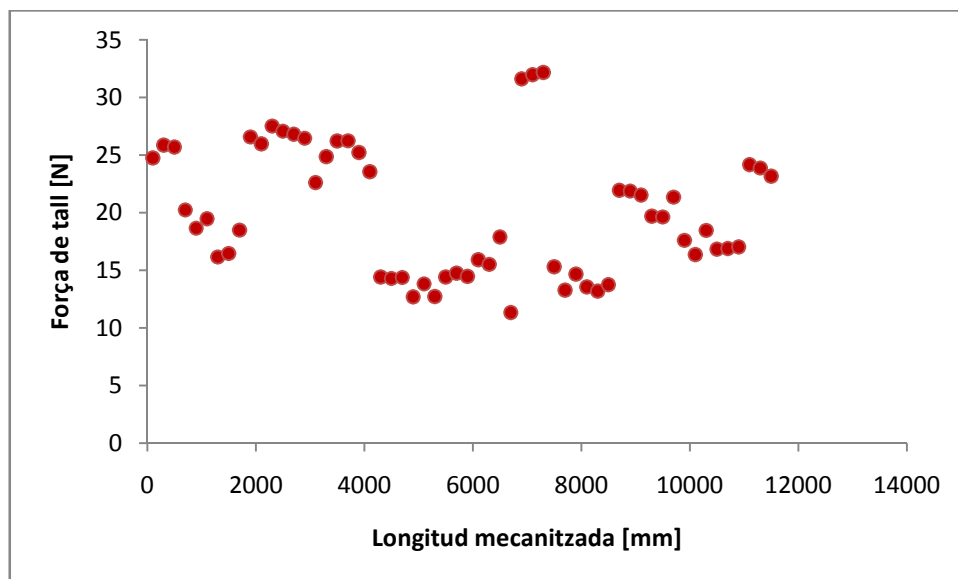


Figura 3-9-4. Força de tall al llarg de la longitud recorreguda de l'eina 9.

3.9.3 Estat de l'eina

A la Figura 3-9-5 es mostra l'eina utilitzada en l'experiment 9. Es pot apreciar un desgast a tot el fil de tall, i més evident a la zona central.

Pel que fa a les puntes del fil de tall, s'hi poden apreciar petites osques. Aquesta eina es troba bastant gastada.

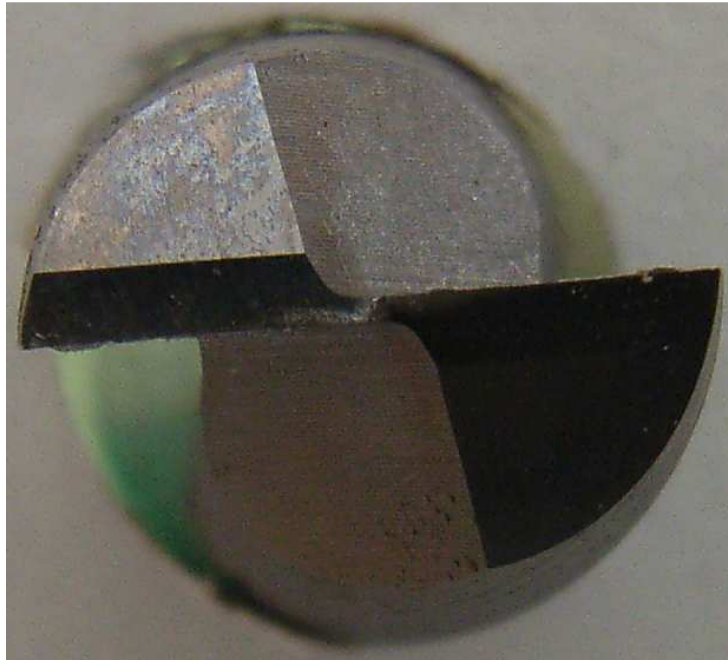


Figura 3-9-5. Estat de l'eina 9 després de mecanitzar.

3.10 Experiment 10

3.10.1 Rugositat superficial

En l'experiment en qüestió, la rugositat disminueix de forma clara a mesura que s'utilitza l'eina. A la Figura 3-10-1 es mostra aquesta tendència. La rugositat inicial es troba al voltant dels $0.9\mu\text{m}$, mentre que al final de l'experimentació, es prenen valors inferiors als $0.6\mu\text{m}$.

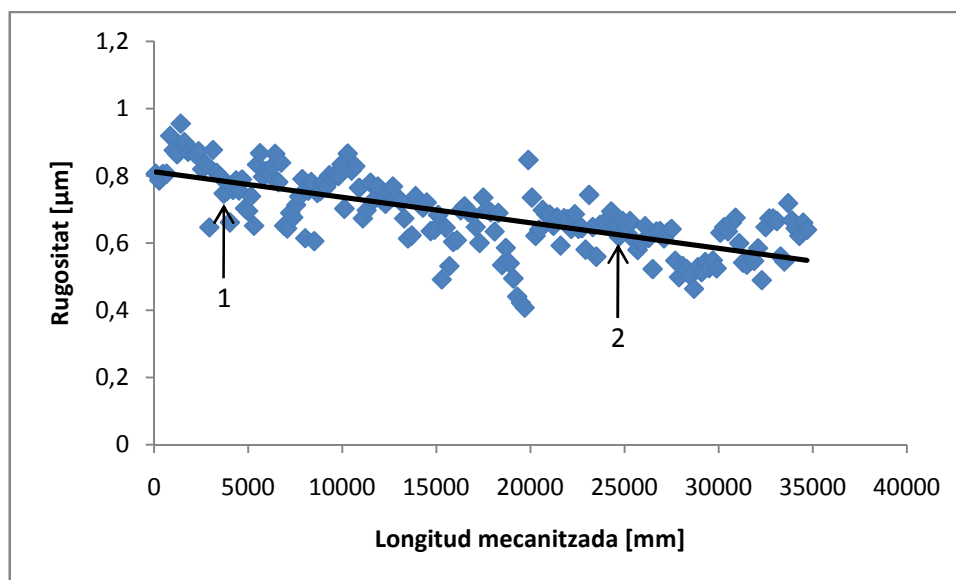


Figura 3-10-1. Rugositat al llarg de la longitud mecanitzada de l'eina 10.

Els punts 1 i 2 assenyalats de la Figura 3-10-1 es mostren a la Figura 3-10-2 i Figura 3-10-3 respectivament. Entre els dos perfils mesurats mostrats, es pot veure com en el segon, els pics de rugositat es troben aixafats per la part superior, disminuint així la rugositat.

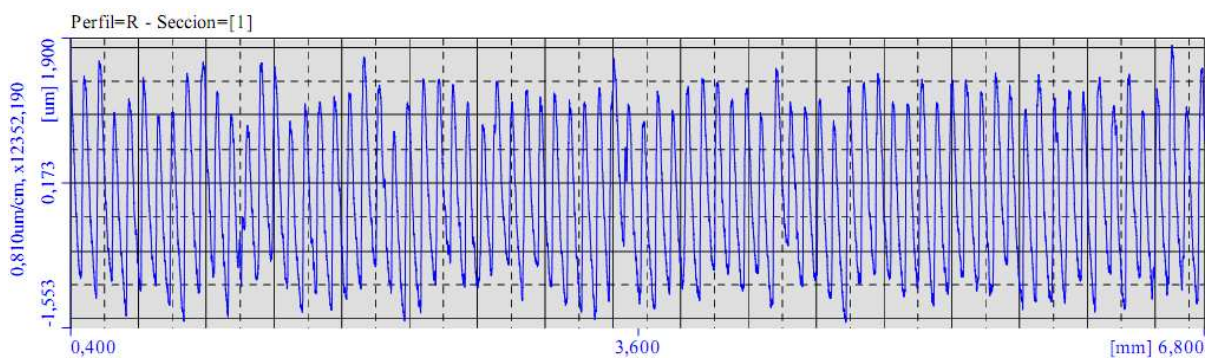


Figura 3-10-2. Perfil de rugositat del punt 1.

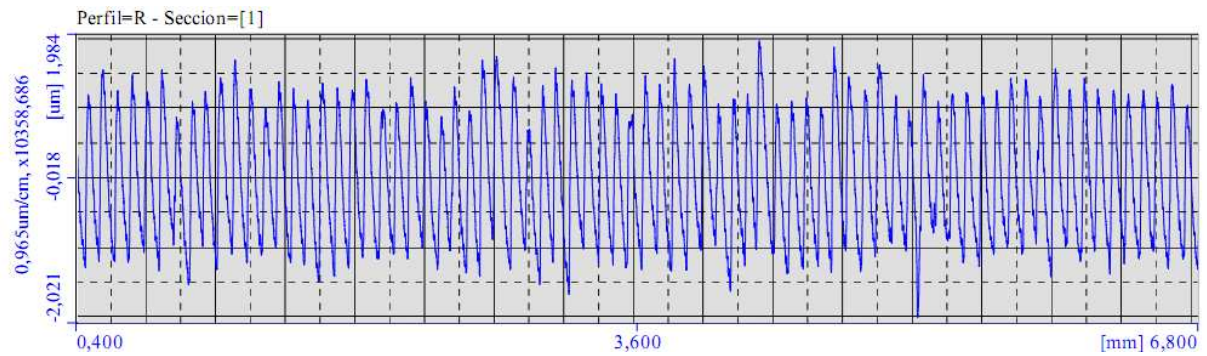


Figura 3-10-3. Perfil de rugositat del punt 2.

3.10.2 Forces de tall

Les forces de tall, mostrades a la Figura 3-10-4, varin entre els 5N i els 25N per aquestes condicions de tall.

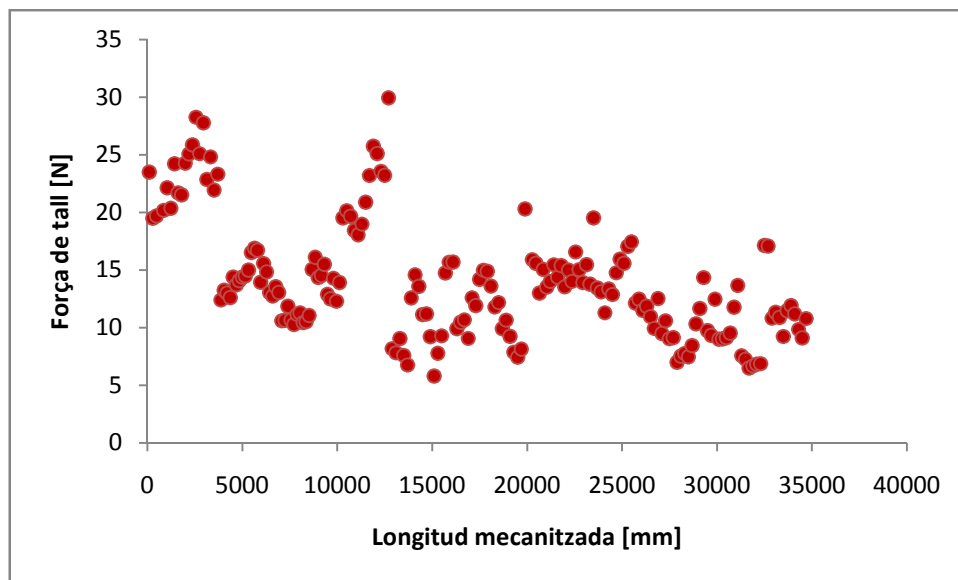


Figura 3-10-4. Força de tall al llarg de la longitud recorreguda de l'eina 10.

3.10.3 Estat de l'eina

A la Figura 3-10-5 es mostra l'estat de l'eina després de l'experimentació. Es pot veure el fil de tall en molt bon estat, ja que només s'observa un lleuger desgast a la part central.

El fil de tall es veu recte, sense presentar osques. Les petites oscil·lacions de la imatge és la ferritja enganxada.

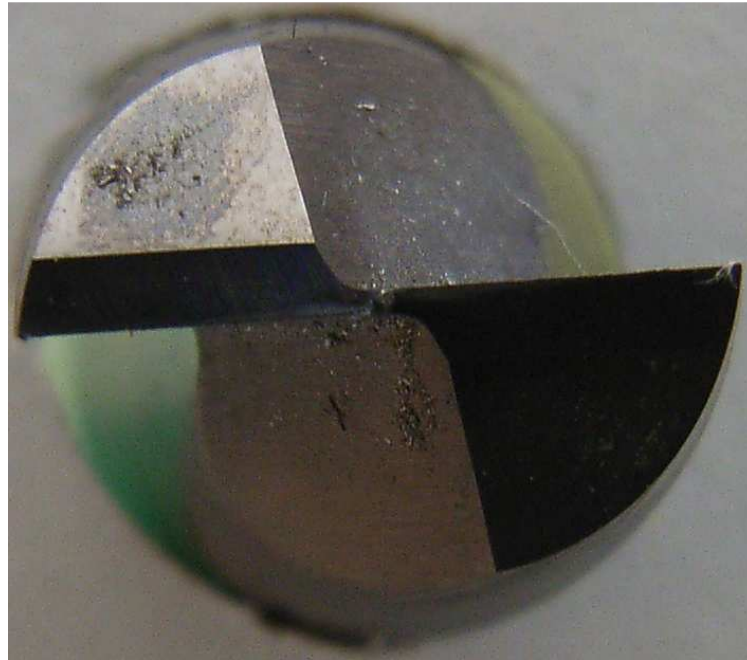


Figura 3-10-5. Imatge de l'eina utilitzada per l'experiment 10.

3.11 Experiment 11

3.11.1 Rugositat superficial

La Figura 3-11-1 mostra l'evolució de la rugositat amb la longitud mecanitzada de l'experiment 11. En aquest cas, la tendència és de decreixer ràpidament en un principi, per més endavant disminuir, però no tan pronunciadament. La rugositat passa de valors inicials propers als $2\mu\text{m}$ fins a valors finals propers als $1.3\mu\text{m}$.

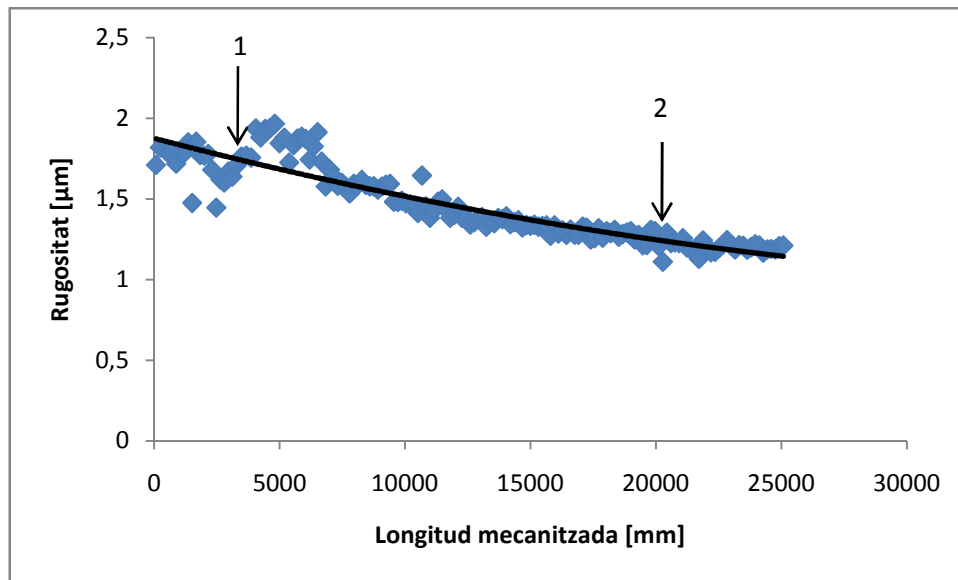


Figura 3-11-1. Rugositat al llarg de la longitud mecanitzada de l'eina 11.

La Figura 3-11-2 mostra el perfil mesurat del punt 1 assenyalat a la Figura 3-11-1, mentre que la Figura 3-11-3 mostra el perfil del punt 2.

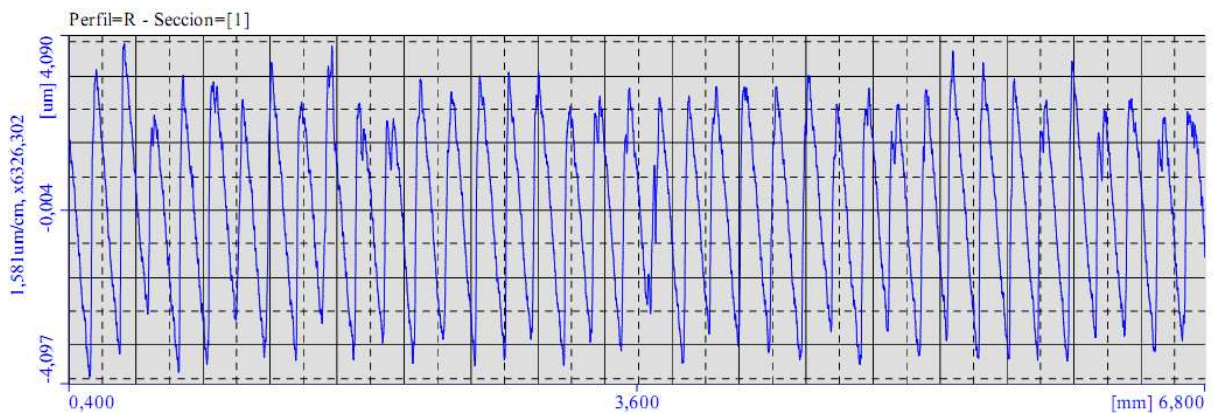


Figura 3-11-2. Perfil de rugositat del punt 1.

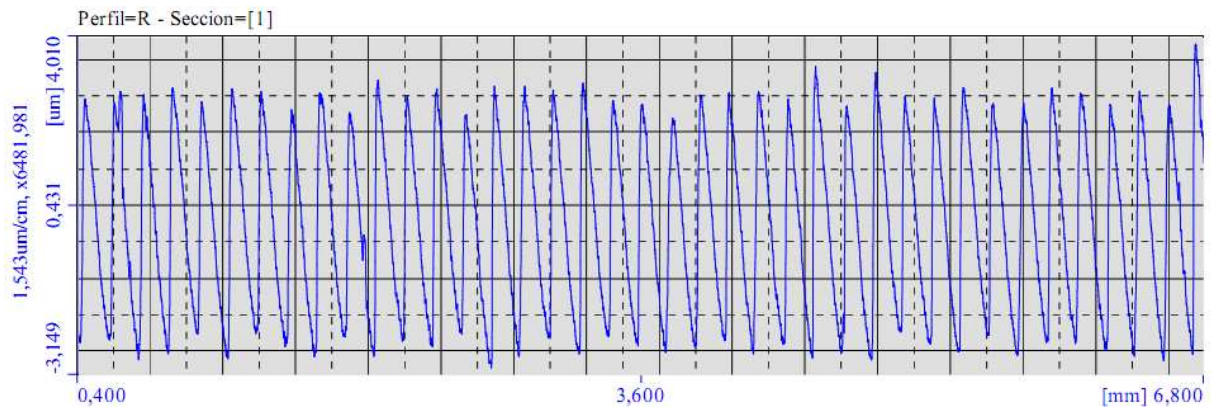


Figura 3-11-3. Perfil de rugositat del punt 2.

En aquest experiment no es veuen grans diferències entre els perfils mostrats, simplement una disminució de l'amplitud dels pics.

3.11.2 Forces de tall

La Figura 3-11-4 mostra els valors de la força de tall per l'experiment 11. Aquests valors es troben entre els 10N i els 20N, tret d'un conjunt de valors que sobresurten de la resta.

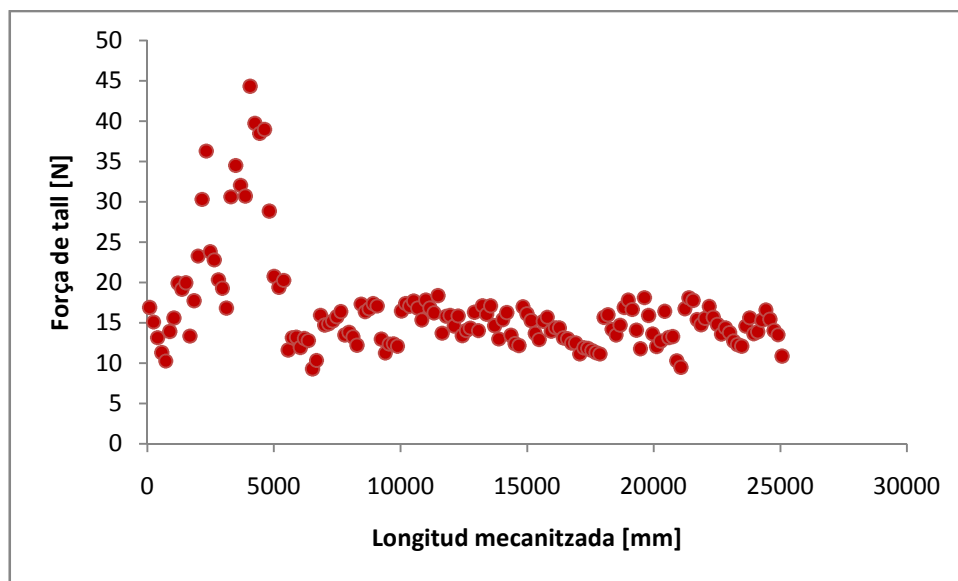


Figura 3-11-4. Força de tall al llarg de la longitud recorreguda de l'eina 11.

3.11.3 Estat de l'eina

La Figura 3-11-5 mostra una fotografia de l'eina després de l'experiment 11. Es pot observar el fil de tall lleugerament gastat a la part central, però no presenta cap osca ni cap tipus d'imperfecció.

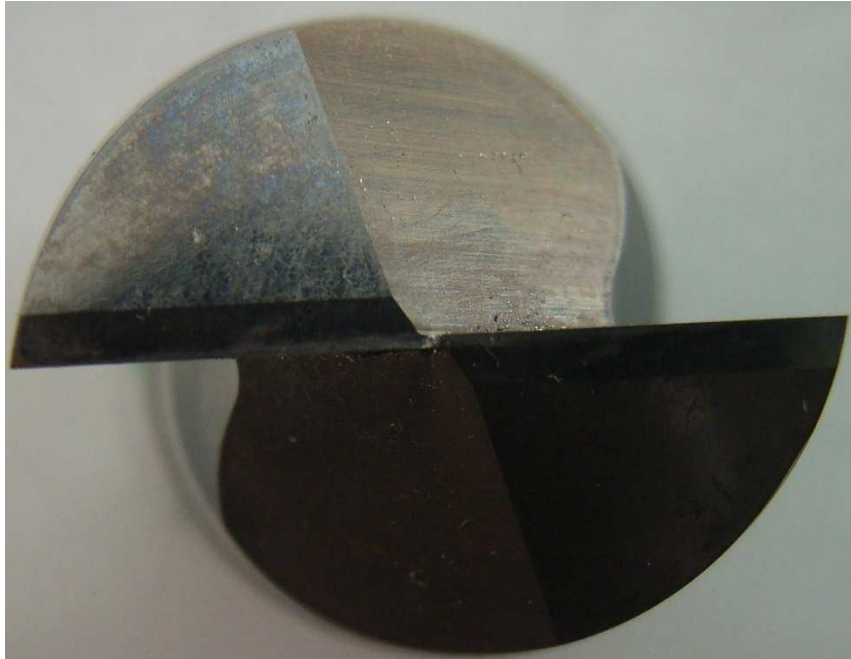


Figura 3-11-5. Imatge de l'eina utilitzada per l'experiment 11.

3.12 Experiment 12

3.12.1 Rugositat superficial

La Figura 3-12-1 representa l'evolució de la rugositat a mesura que es va mecanitzant amb l'eina 12. Es pot observar que els punts tenen una tendència, que es pot aproximar a una recta, amb tendència a disminuir. La rugositat al principi de l'experiment es troba al voltant de $1.9\mu\text{m}$, i baixa fins a una rugositat de $1.5\mu\text{m}$ quan s'han mecanitzat uns 25000mm.

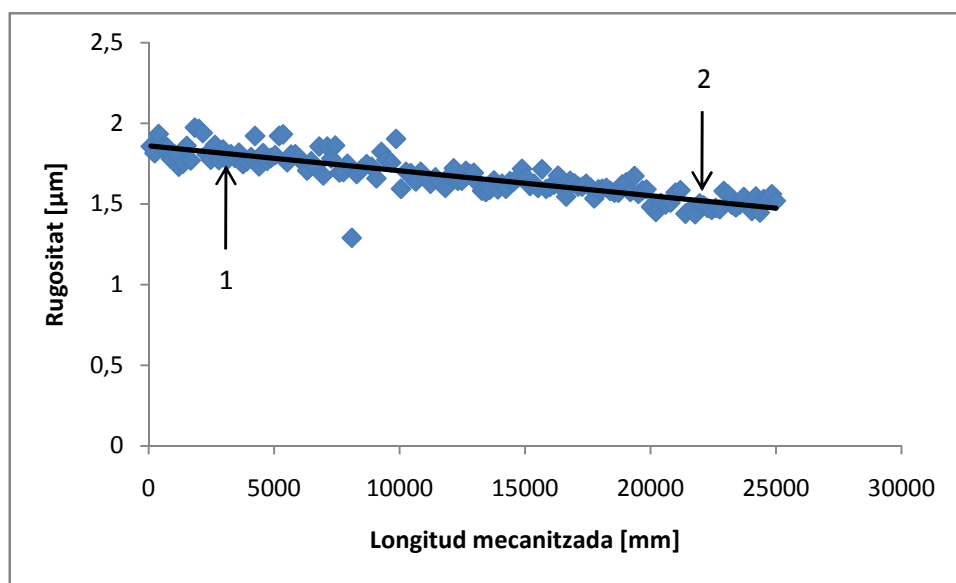


Figura 3-12-1. Rugositat al llarg de la longitud mecanitzada de l'eina 12.

Els punts 1 i 2 que es destaquen a la Figura 3-12-1 es mostren a la Figura 3-12-2 i la Figura 3-12-3 respectivament.

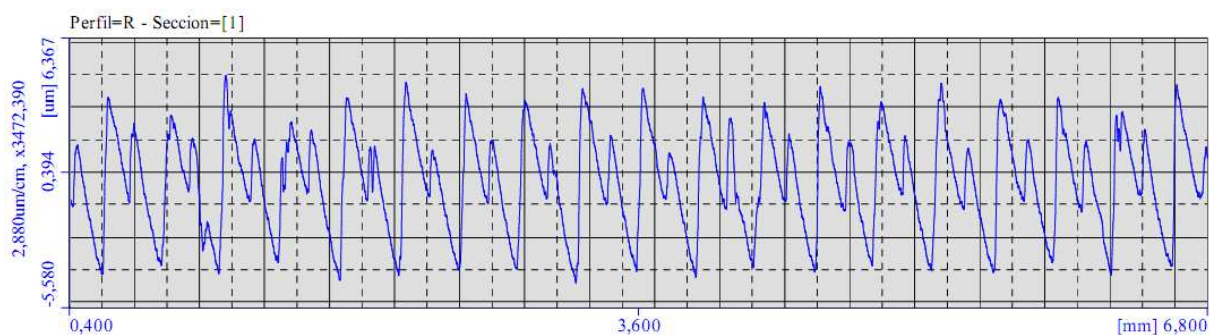


Figura 3-12-2. Perfil de rugositat del punt 1.

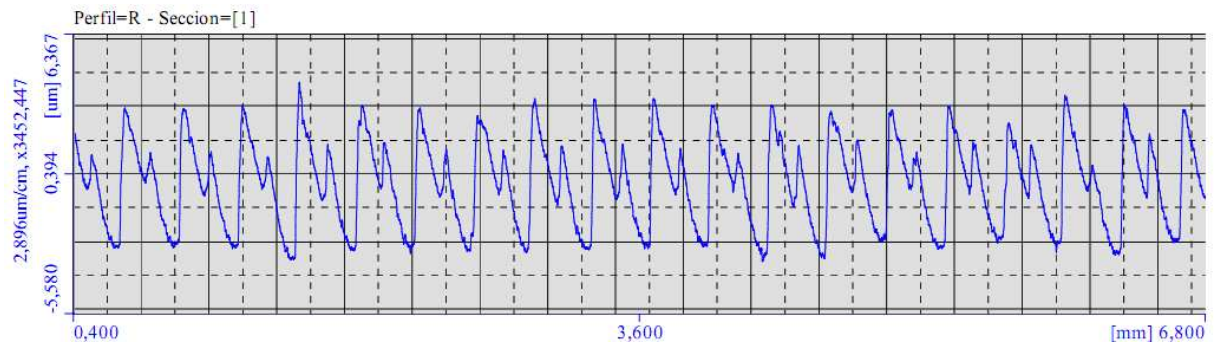


Figura 3-12-3. Perfil de rugositat del punt 2.

Observant els dos perfils extrets del rugosímetre, dels punts 1 i 2, es veu que al punt 2 es produeix una aixafament dels pics de rugositat, fent-la disminuir considerablement.

3.12.2 Forces de tall

A la Figura 3-12-4 es mostra l'evolució de les forces de tall. Aquesta força de tall es troba entre els 10N i els 40N en la majoria de les mesures.

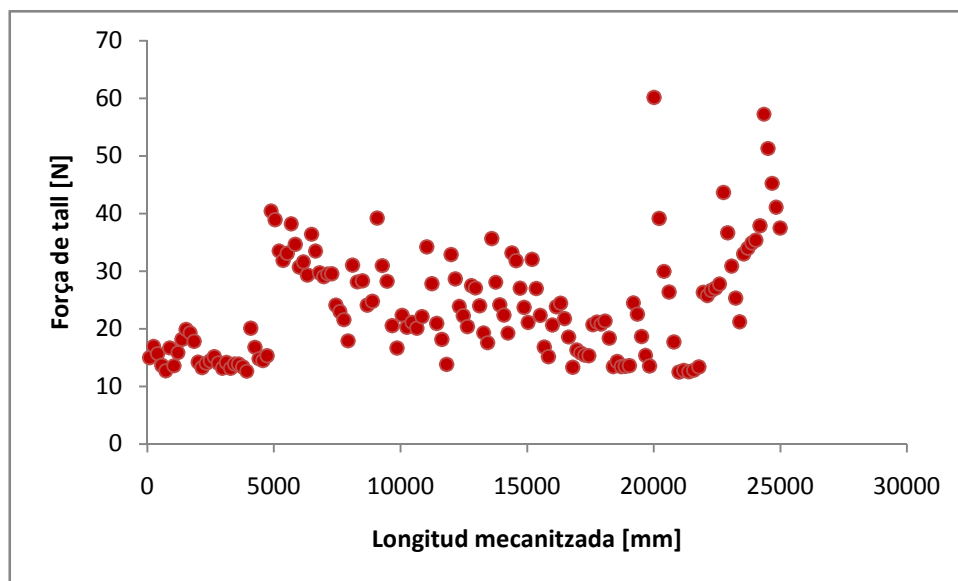


Figura 3-12-4. Força de tall al llarg de la longitud recorreguda de l'eina 12.

3.12.3 Estat de l'eina

A la Figura 3-12-5 es mostra una imatge de l'eina un cop finalitzat l'experiment 12. Es pot observar com el fil de tall es troba força gastat a la part central, però als extrems, aquest continua en perfecte estat.

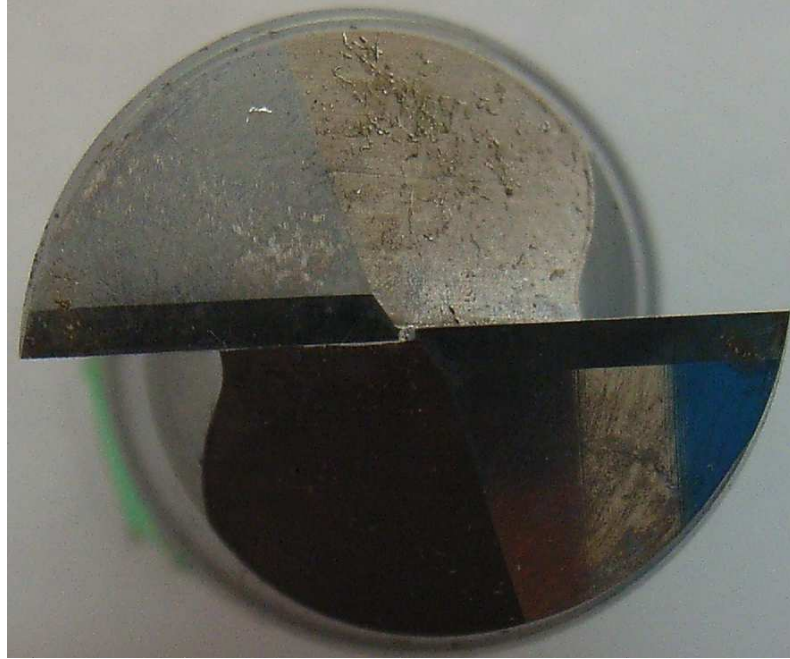


Figura 3-12-5. Estat de l'eina 12 un cop realitzat l'experiment.

4 Comparativa dels sistemes de lubricació

S'agrupen els experiments amb grups de paràmetres de tall constant. Això és, experiments amb la mateixa velocitat de rotació, diàmetre d'eina i velocitat d'avanç. D'aquesta manera es poden observar les diferències entre usar els diferents mètodes de refrigeració. Aquests grups són els esmentats a la Taula 3-1, al principi del capítol 3 d'aquest document.

4.1 Grup 1

A la Figura 4-1 es recullen els experiments 1, 2 i 9, els quals mantenen constants els paràmetres de tall i, tal com es mostra a la llegenda, només varia el mètode de refrigeració. Aquest conjunt d'experiments s'han realitzat a 12000rpm, 2000mm/min i amb eines de 6mm de diàmetre.

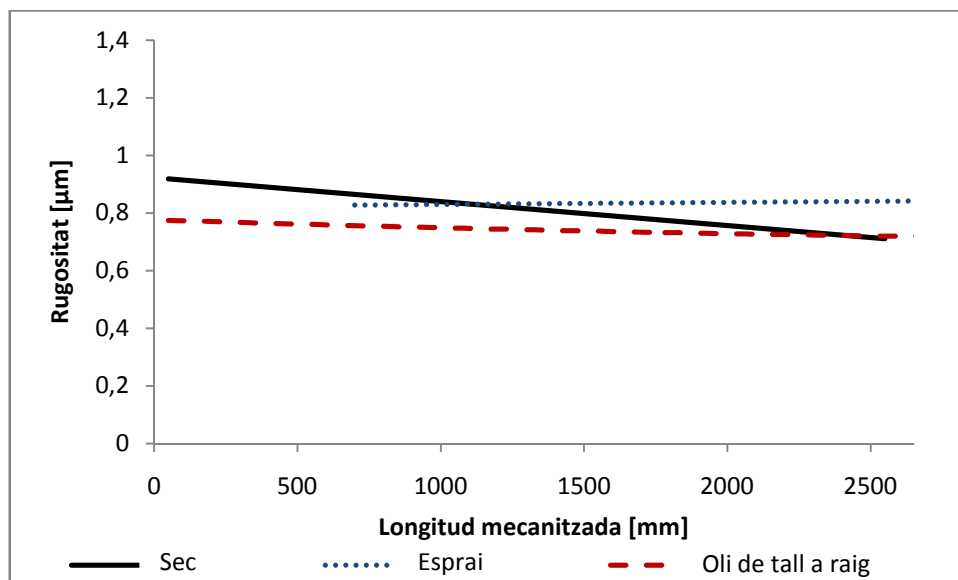


Figura 4-1. Comparativa dels experiments 1, 2 i 9

A la Figura 4-1 s'observa que la diferència de la rugositat superficial entre els diferents experiments és força petita, al voltant de $0,2\mu\text{m}$. Segons les tendències, la rugositat és inferior quan s'utilitza oli de tall, mentre que en aquest cas, treballar en sec no comporta cap avantatge, ja que la vida de l'eina és inferior i la rugositat és més alta.

A la Figura 4-2 es mostra una comparativa entre la refrigeració convencional i l'ús d'esprai. S'observa que subministrant el refrigerant com un aerosol, la rugositat és sempre més alta. No obstant, s'aprecia que la tendència de la línia discontinua és de créixer més que la línia de punts, fet que caldria tenir en compte alhora de mecanitzar longituds més altes.

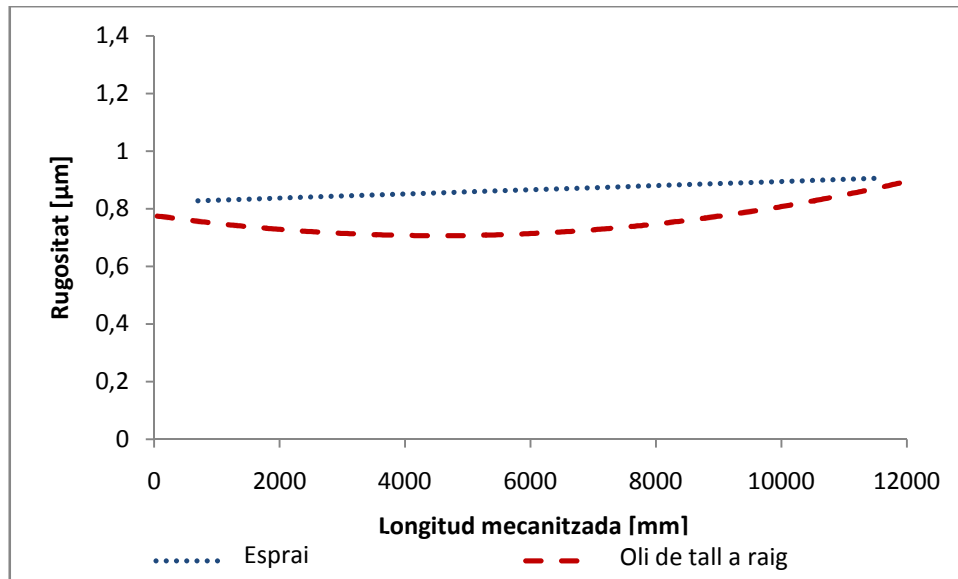


Figura 4-2. Comparativa dels experiments amb esprai i oli de tall a raig.

Pel que fa a les forces de tall, aquestes es troben molt disperses i és per això que no es representen. Tot i això, el rang de les forces de tall, mostrades al capítol 3 per cadascun dels experiments, és molt similar entre els dos mètodes de subministrar el refrigerant. Pel que fa a la força de tall en sec, aquesta és lleugerament superior, però no excessivament.

La Figura 4-3 mostra l'estat de les eines utilitzades per aquest grup d'experiments. Es pot observar com l'ús o no de refrigerant és essencial, l'estat de l'eina 1 és molt més dolent que les altres eines, tot i haver mecanitzat unes cinc vegades menys.

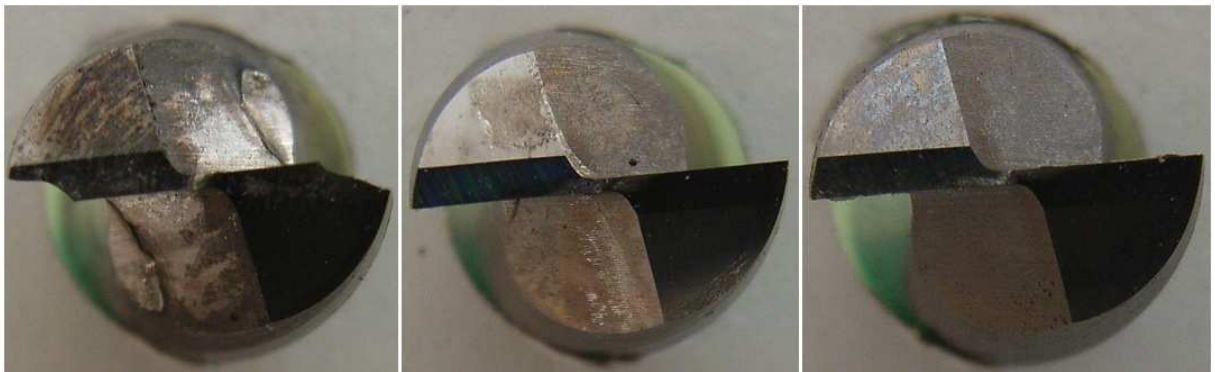


Figura 4-3. D'esquerra a dreta, eines dels experiments 1, 2 i 9.

Entre utilitzar el sistema de lubricació convencional o el sistema polvoritzat, l'estat de l'eina és bastant millor amb el mètode tradicional, ja que només es mostra desgast a la part central de l'eina. Utilitzant l'oli de tall en esprai, la part central de l'eina es troba més gastat, i el fil de tall presenta irregularitats als seus extrems.

Així doncs, sota aquestes condicions, i tenint en compte únicament els paràmetres estudiats, el millor sistema de lubricació és el convencional, seguit de la refrigeració amb esprai i finalment la mecanització en sec.

4.2 Grup 2

A la Figura 4-4 es mostra la rugositat superficial dels experiments 5, 6 i 10. Aquests experiments s'han realitzat a 12000rpm, 1000mm/min i amb eines de 6mm de diàmetre.

S'observa que la rugositat és inferior quan es treballa sense lubricant. La refrigeració mitjançant l'aerosol provoca una rugositat aproximadament 0.1 μ m superior. El sistema de lubricació convencional es troba entre mig d'aquests dos.

Les tendències d'aquests experiments són a reduir la rugositat, però amb diferents pendents. Els experiments sense refrigerant i polvoritzats, tenen un pendent semblant, mentre que quan s'utilitza el sistema convencional, la tendència és gairebé plana.

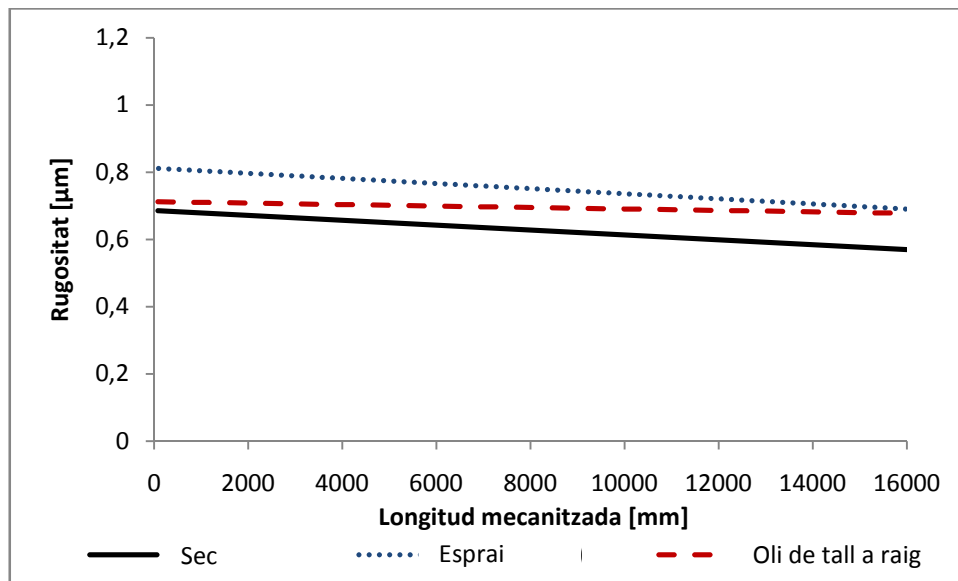


Figura 4-4. Comparació dels experiments 5, 6 i 10

Al voltant dels 16000mm, mecanitzant sense refrigerant es van començar a observar imperfeccions a la superfície mecanitzada. És per aquest motiu que es mostra la gràfica fins a aquest punt, ja que la rugositat a les imperfeccions donava valors molt elevats.

En canvi, els altres dos experiments, es van allargar fins a una longitud total d'uns 35000mm. La comparativa de rugositats es mostra a la Figura 4-5, on s'aprecia que les tendències són molt semblants, però hi ha un punt, al voltant dels 20000mm, on aquestes es creuen.

Si al principi utilitzant el refrigerant a raig s'obtenia una rugositat inferior, passats aquests 20000mm, la rugositat és menor quan s'utilitza el sistema de refrigeració polvoritzat. No obstant, la diferència entre un o altre mètode no es important.

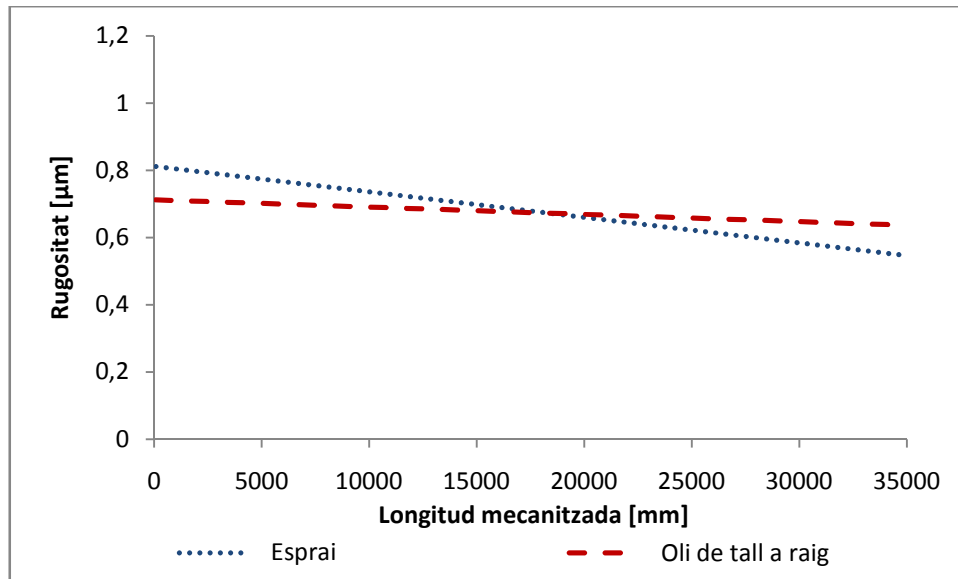


Figura 4-5. Rugositat dels experiments amb esprai i oli de tall a raig.

De la mateixa manera que en l'anterior grup d'experiments, les forces resulten molt disperses. El rang de forces utilitzant lubricant se situa entre els 5N i els 25N, mentre que quan no s'utilitza lubricant, les forces es troben entre els 10N i els 30N.

A la Figura 4-6 es mostra l'estat de les eines utilitzades en els experiments en qüestió. L'eina que està en pitjor estat és la que s'ha utilitzat per mecanitzar sense refrigerant, ja que té el fil de tall gastat pel mig, i inclús malmès als extrems.



Figura 4-6. D'esquerra a dreta, eines dels experiments 5, 6 i 10.

Pel que fa a les dues experiències amb refrigerant, no s'observa gaire diferència entre una i altre, només s'observa una mica més de desgast a la part central del fil de tall de l'eina que s'ha refrigerat amb esprai, però l'estat de les dues és correcte.

A la vista dels resultats, sota aquestes condicions i amb aquest tipus d'eina, treballar amb qualsevol dels dos sistemes de refrigeració és correcte. Si es té en compte l'estalvi amb temes d'olis de tall i el menor impacte mediambiental, la refrigeració mitjançant aerosol sembla més indicat.

4.3 Grup 3

En aquest grup, es comparen els experiments realitzats amb eines de 16mm de diàmetre, amb una velocitat de rotació de 4500rpm i un avanç lineal de 750mm/min.

La Figura 4-7 mostra la rugositat dels tres experiments esmentats. Es pot observar com, al treballar sense lubricant, la rugositat és molt més baixa, gairebé quatre vegades inferior. Aquesta rugositat se situa al voltant dels 0.5 μ m, mentre que quan s'utilitza lubricant, la rugositat es troba entre els 1.6 μ m i els 1.9 μ m.

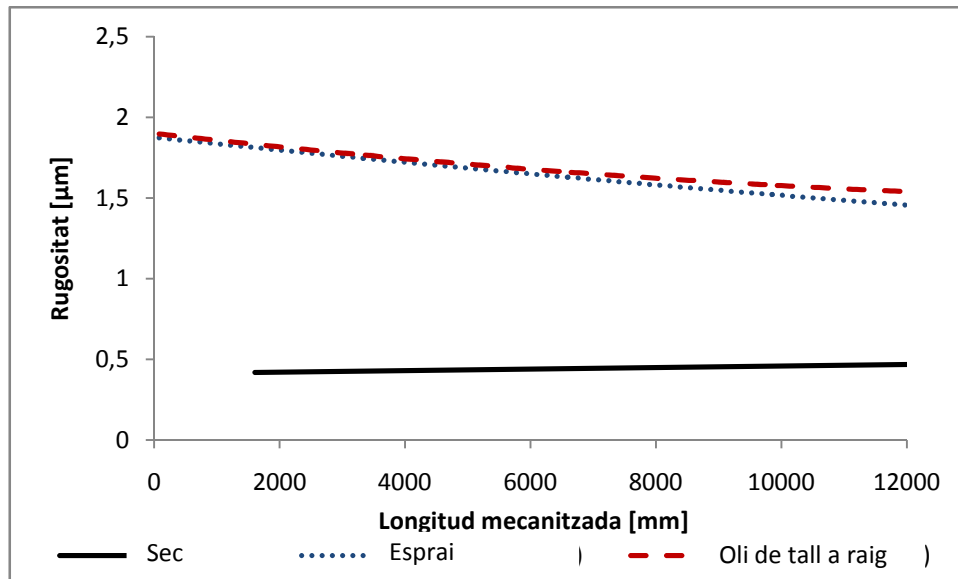


Figura 4-7. Comparació de la rugositat dels experiments 3, 4 i 11.

Les tendències dels experiments en els quals s'utilitza refrigerant, són molt semblants durant els primers mil·límetres mecanitzats, però tendeixen a separar-se a mesura que es mecanitza. Durant tota l'experimentació, al treballar amb refrigerant polvoritzat s'obté una rugositat superficial inferior, però és a partir dels 10000mm mecanitzats quan aquesta diferència es fa més perceptible, tal i com es pot apreciar a la Figura 4-8.

Al final de l'experimentació, sembla que la rugositat s'estabilitza al voltant dels 1.7 μ m per l'experiment amb refrigeració convencional, mentre que amb l'oli de tall polvoritzat, encara mostra una tendència a la baixa. Aquesta diferència és important, sent superior als 0.2 μ m.

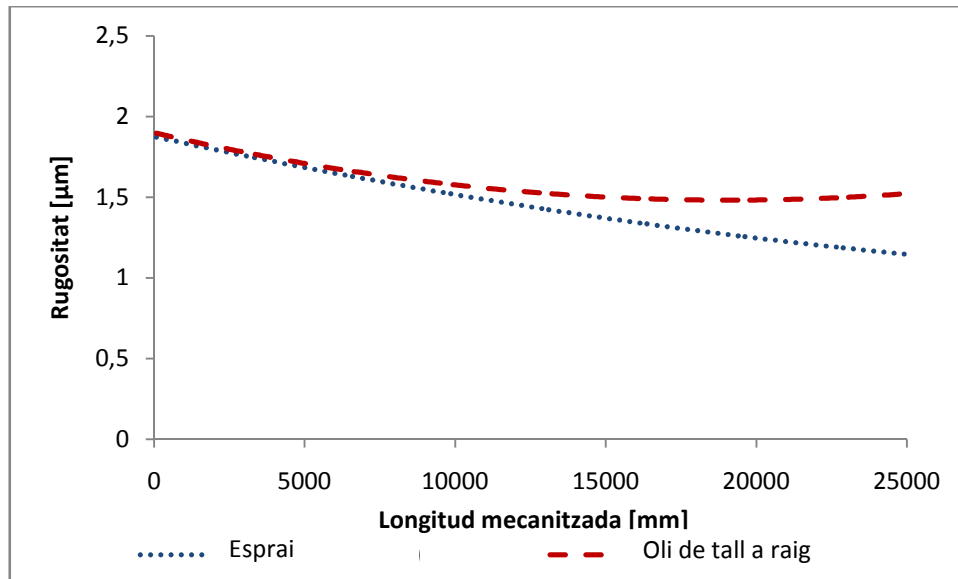


Figura 4-8. Rugositat dels experiments amb esprai i refrigeració convencional.

Pel que fa a les forces de tall, com en la resta de casos, són molt disperses, però es veuen dos rangs diferents de forces pels experiments amb lubricant i per l'experiment en sec. Si pels primers casos les forces de tall se situen entre els 5N i els 20N, quan es treballa en sec, aquest rang és una mica superior, essent entre 10N i 30N.

L'estat superficial de les eines, mostrat a la Figura 4-9, és bastant bo. Al treballar molt per sota de les condicions de tall especificades pel fabricant de les eines, aquestes gairebé no mostren desgast. L'eina de l'experiment 3 es veu lleugerament gastada per la part central del fil de tall, mentre que les altres dues, mostren un lleuger desgast a la zona central del fil de tall.

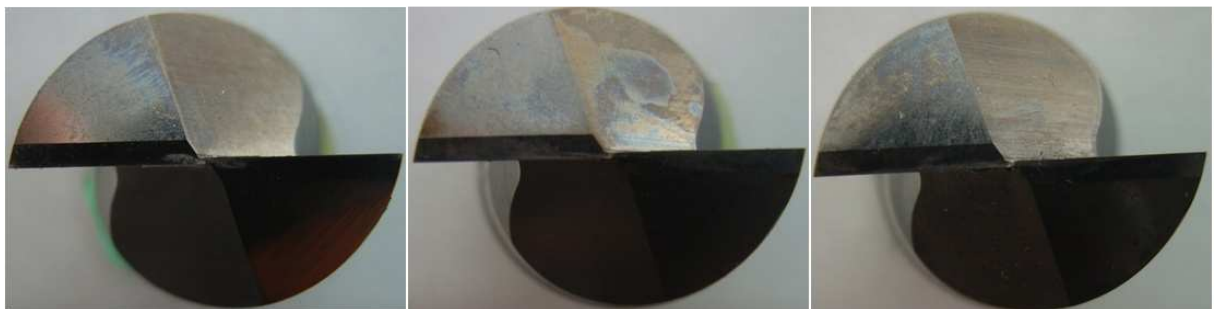


Figura 4-9. D'esquerra a dreta, estat de les eines 3, 4 i 11.

En aquest grup d'experiments, es mostra una clara diferència entre l'ús o l'absència de lubricant. Per a operacions d'acabat, és aconsellable treballar sense refrigerant, ja que l'acabat superficial és molt millor, i l'eina treballa molt per sota de les condicions crítiques segons el fabricant. Per a operacions de desbast, on no importa l'acabat, és recomanable treballar amb refrigerant, ja que les forces de tall resulten menors i així ho demostra l'estat de les eines, que és millor tot i haver mecanitzat dues vegades més.

4.4 Grup 4

Aquest grup el conformen els experiments realitzats amb eines de 16mm de diàmetre, que treballen amb una velocitat de rotació de 4500rpm i un avanç lineal de 1500mm/min.

A la Figura 4-10 es mostra la rugositat superficial dels tres experiments. S'observa clarament que l'experiment en sec té una rugositat inferior als altres dos assaigs. Aquesta rugositat se situa al voltant dels 1.4 μ m. També s'observa que treballant amb el refrigerant polvoritzat, la rugositat resulta bastant inferior que treballant amb lubricant a raig.

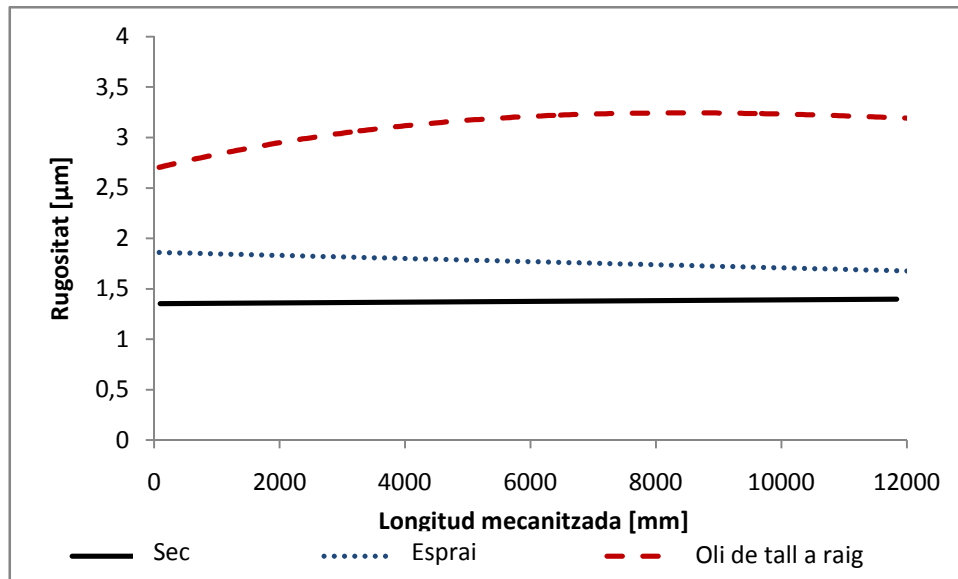


Figura 4-10. Rugositat superficial dels experiments 7, 8 i 12.

La rugositat al treballar amb el sistema convencional de refrigerant es troba al voltant dels 3 μ m, mentre que si aquest es subministra en forma d'esprai, la rugositat es redueix considerablement, baixant fins als 1.7 μ m.

A la Figura 4-11 es mostren els assaigs que utilitzen refrigerant i, com ja s'ha comentat, es veu una diferència important entre un mètode i l'altre. Pel que fa a les tendències, treballant amb aerosol, la rugositat tendeix a decreixer, passant de valors de 1.8 μ m al principi a valors de 1.6 μ m als 25000mm. L'experimentació on s'utilitza la refrigeració tradicional, presenta un augment de la rugositat al començament, per posteriorment estabilitzar-se al voltant dels 3 μ m.

Així doncs, la diferència és important entre els dos mètodes de refrigeració. Això pot ser degut a que la lubricació amb l'aerosol, com ja s'ha comentat als conceptes previs, és més eficient, arribant a tots els punts més ràpid. Com que es treballa amb un avanç important, sobretot pel diàmetre d'eina estudiat, aquesta pot ser l'explicació d'aquesta diferència important.

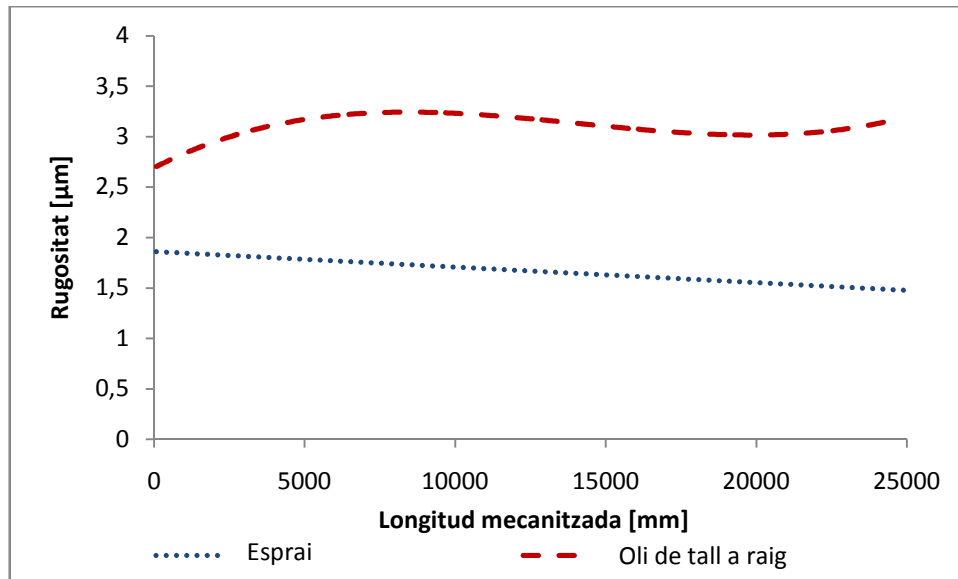


Figura 4-11. Rugositat superficial dels experiments amb refrigerant.

Les forces de tall, com en els altres casos, mostren diferències amb l'ús o no de lubricant, però amb les dues metodologies de subministrar el refrigerant, no s'aprecien canvis evidents. Així doncs, el rang de forces utilitzant lubricant se situa entre els 15N i els 40N, mentre que quan es treballa en sec, aquest rang puja i se situa entre els 20N i els 60N.

Aquest grup d'experiments, tot i realitzar-se a un avanç el doble que l'anterior, continua essent força inferior a les condicions de tall subministrades pel fabricant. A la Figura 4-12, on es mostra l'estat de les eines utilitzades, es veu que es troben en perfecte estat, i que no hi ha senyals de desgast.

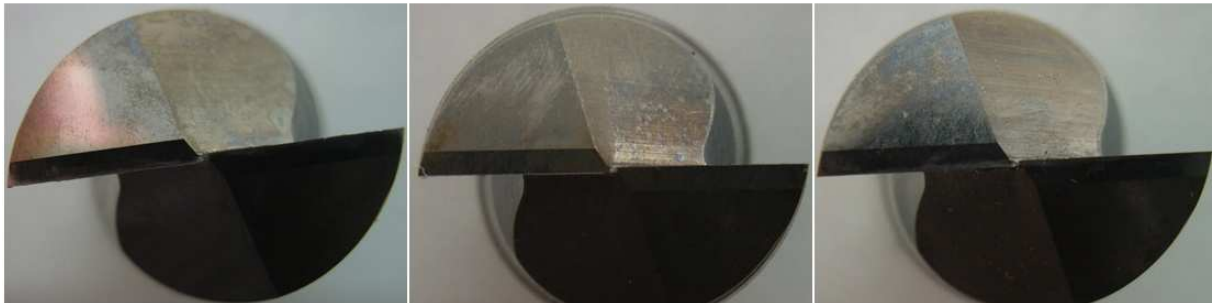


Figura 4-12. D'esquerra a dreta, estat de les eines dels experiments 7, 8 i 12.

Dins aquest conjunt d'experiments, amb aquestes condicions, sembla que el sistema idoni de lubricació és subministrant-lo com esprai, ja que la rugositat superficial és propera a la obtinguda en condicions seques, mentre que les forces són inferiors, i l'eina es conserva en millor estat.

5 Altres comparatives

5.1 Comparativa segons diàmetre d'eina

Es tenen sis assaigs amb un avanç per dent de 0.083mm/dent, dels quals la meitat són amb eines de 6mm i la resta amb eines de 16mm. A la Figura 5-1 es mostra una gràfica amb els diferents experiments.

A primer cop d'ull es veu que les eines de diàmetre 16mm duren molt més que les de 6mm. Si s'observa la línia contínua negra, que representa l'experiment 1 amb l'eina de diàmetre 6, es veu que acaba al voltant dels 2500mm, mentre que l'equivalent amb eina de diàmetre 16, la línia de punt i ratlla, arriba fins als 13000mm. Comparant l'estat de les dues eines, es veu clarament com a major diàmetre, major vida té l'eina, perquè l'eina de 6mm de diàmetre ha arribat al final de la seva vida, mentre que la de 16mm gairebé no està gastada. Aquest resultat era previsible, ja que el mateix fabricant de les eines recomana avanços per dent majors per l'eina de diàmetre gran.

Pel que fa als experiments amb refrigerant, també es pot apreciar que l'estat de les eines, tot i haver mecanitzat el doble, és millor amb les eines de diàmetre superior.

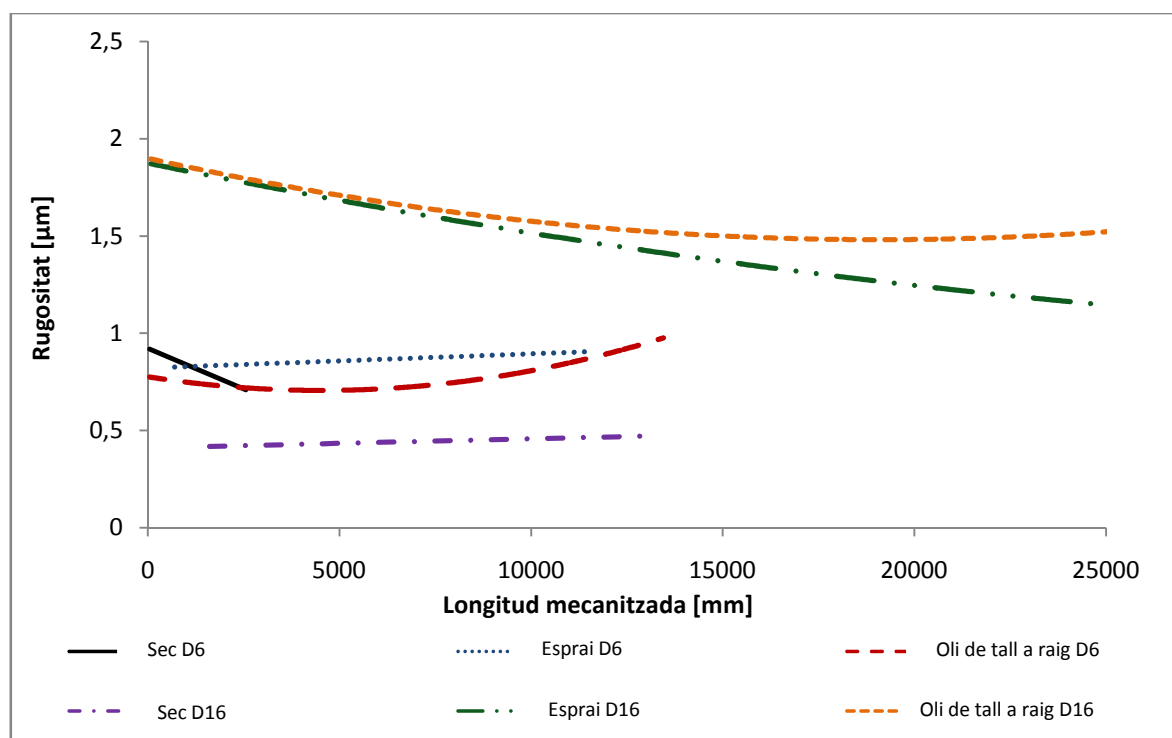


Figura 5-1. Rugositat dels experiments amb un avanç per dent de 0.083mm/dent.

A la Figura 5-1 es mostren tots els resultats. Per tal d'apreciar les semblances i diferències entre eines de diferent diàmetre operant sota el mateix avanç per dent i el mateix nivell de refrigerant, es representen els mateixos assaigs amb diverses gràfiques amb els experiments a comparar.

A la Figura 5-2 es mostren els experiments 1 i 3, els quals comparteixen un avanç per dent de 0.083mm/dent, i el fet de mecanitzar sense refrigerant. Com ja s'ha comentat anteriorment, s'ha arribat al final de la vida de l'eina de diàmetre 6mm, per la qual cosa, a igual avanç per dent, les eines de major diàmetre tenen una vida més llarga.

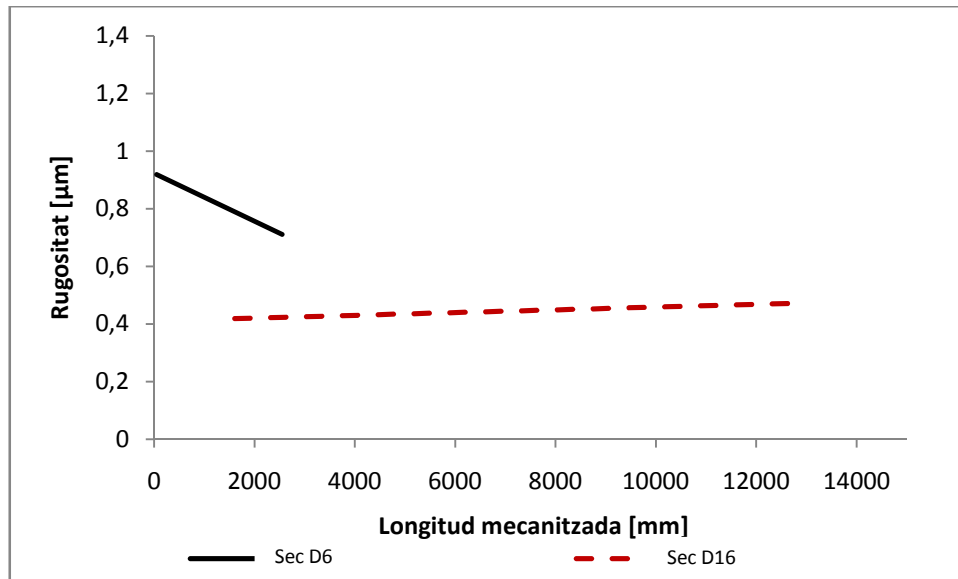


Figura 5-2. Rugositat dels experiments amb igual avanç per dent i sense refrigerant.

Pel que fa a la rugositat superficial, a la Figura 5-2 es mostra com la rugositat és més baixa amb l'eina de 16mm de diàmetre que amb la de 6mm. Aquesta diferència és bastant important, ja que la rugositat que s'obté amb l'eina de 6mm és el doble que amb l'eina de 16mm.

Els assaigs realitzats amb refrigerant també evidencien que el desgast és menor per les eines de diàmetre major, sota les mateixes condicions d'avanç per dent.

A la Figura 5-3 es mostra una comparació de la rugositat entre experiments amb el mateix avanç per dent i refrigerants mitjançant oli de tall polvoritzat.

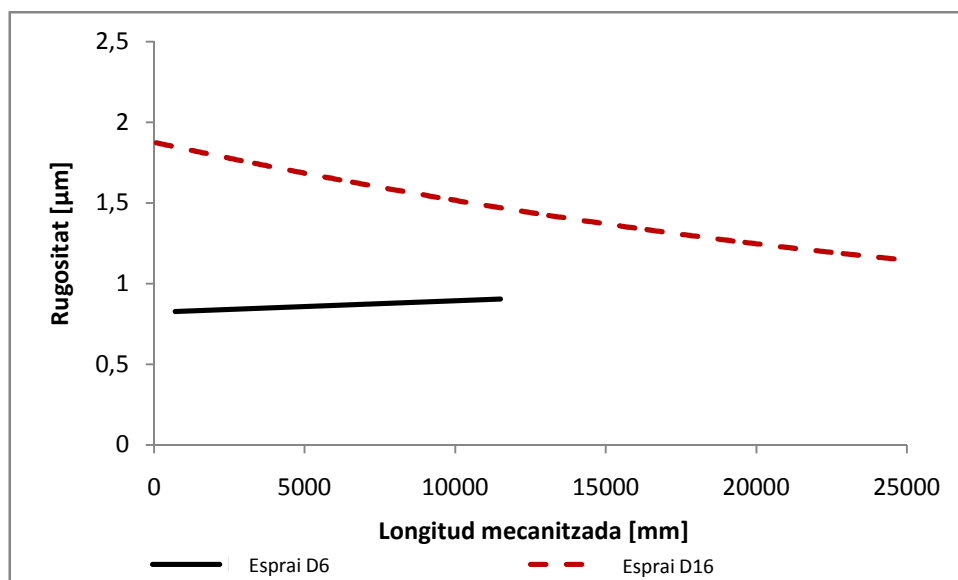


Figura 5-3. Rugositat dels assaigs 9 i 11.

S'observa que, contràriament al que succeïa al mecanitzar en sec, la rugositat és més gran amb l'eina de diàmetre major. El valor d'aquesta rugositat, és aproximadament el doble que el de l'eina de diàmetre 6mm en el tram on són comparables.

L'altre nivell de refrigerant experimentat, oli de tall a raig, mostrat a la Figura 5-4, mostra la mateixa tendència que el cas anterior, on el refrigerant es subministrava polvoritzat. La rugositat amb l'eina de major diàmetre és més alta, aproximadament el doble, que la rugositat mesurada amb l'eina de 6mm de diàmetre.

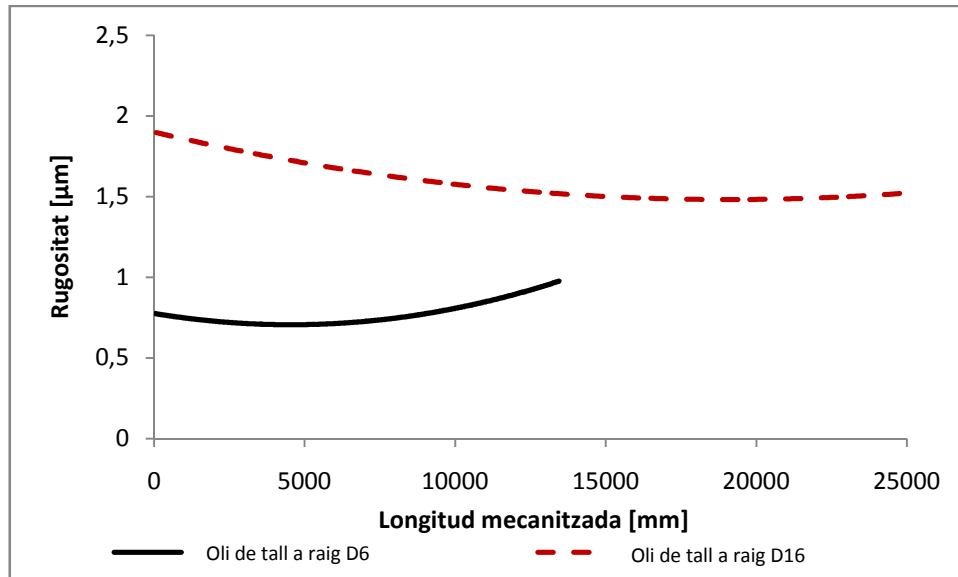


Figura 5-4. Experiments amb avanç per dent de 0.083mm/dent amb refrigeració convencional.

Per resumir, analitzant tots els assaigs mostrats a les gràfiques de l'apartat, s'observa que la rugositat superficial varia molt més amb eines de diàmetre major que amb eines més petites. També s'observa que el canvi de mida de l'eina té efectes oposats al treballar amb refrigerant o sense. Si quan es treballa en sec, un augment del diàmetre de l'eina comporta una disminució de la rugositat mesurada, la presència de refrigerant en l'experimentació fa augmentar la rugositat per eines de major diàmetre.

5.2 Comparativa segons velocitat d'avanç

En aquest apartat es comparen els experiments realitzats amb les mateixes eines i nivells de refrigerant realitzats a diferent velocitat d'avanç. D'aquesta manera es podrà determinar la importància d'aquesta velocitat en la rugositat que queda sobre la superfície mecanitzada.

Per tal de fer la comparativa més entenedora, es representen els diferents assaigs per parelles, on cada tendència correspon a un experiment amb el mateix diàmetre d'eina i nivell de refrigerant però amb un avanç diferent. En totes les gràfiques, l'experiment representat amb línia discontinua té una velocitat d'avanç el doble que l'assaig representat amb línia contínua.

5.2.1 Experimentació amb eines de diàmetre 6mm

A la Figura 5-5 es mostren els assaigs sense refrigerant. S'observa que al doblar l'avanç, la rugositat augmenta lleugerament. També es pot veure que la vida de l'eina disminueix dràsticament, ja que en l'experiment realitzat a 2000mm/min s'ha arribat a la fi de la vida de l'eina amb poc més de 2500mm, i amb l'avanç de 1000mm/dent, les imperfeccions comencen a produir-se passats els 15000mm mecanitzats.

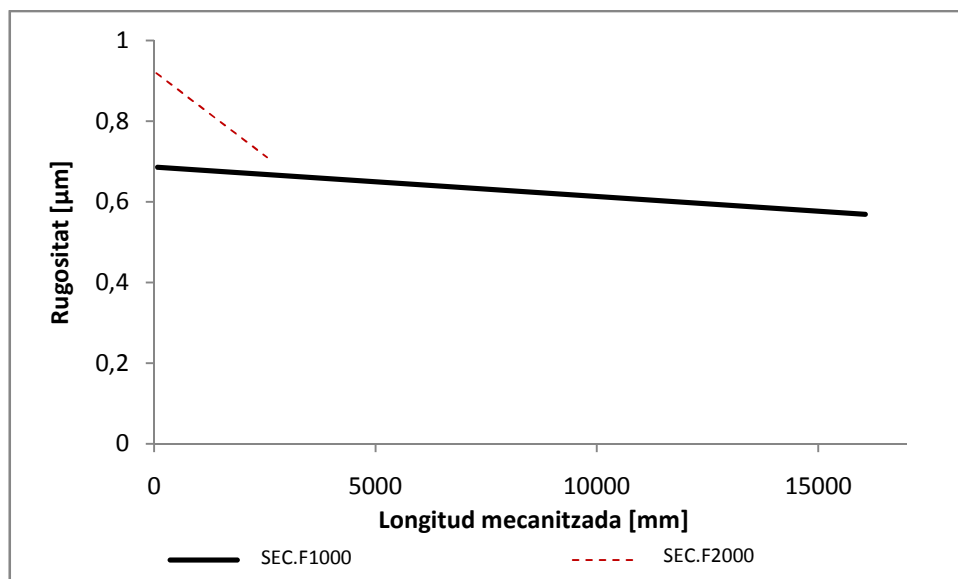


Figura 5-5. Rugositat dels experiments amb eines de 6mm i sense refrigerant.

Els experiments on s'ha utilitzat refrigerant, ja sigui en forma d'esprai o a raig, són els que es mostren a la Figura 5-6 i a la Figura 5-7 respectivament. Quan es dobla la velocitat d'avanç, a l'iniciar l'experimentació no es mostra una variació de la rugositat entre els dos casos, però a mesura que augmenta la distància total mecanitzada, les corbes dels dos assaigs es separen. Per tots dos casos, quan es treballa a 2000mm/min la tendència de la rugositat és d'augmentar, mentre que treballant a 1000mm/min, la tendència és de disminuir.

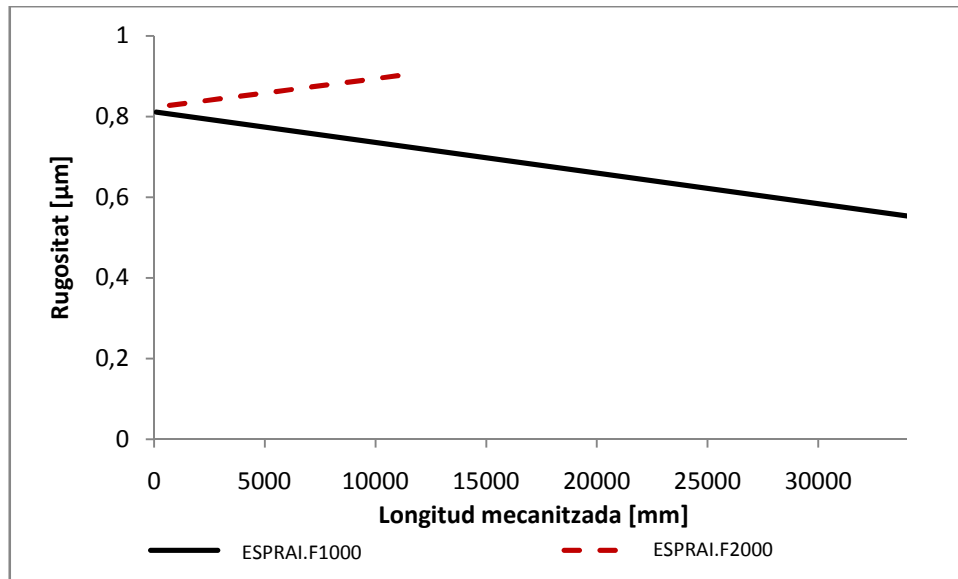


Figura 5-6. Rugositat dels experiments amb eines de 6mm amb refrigeració en esprai.

Als dos casos on s'ha utilitzat refrigerant, observant l'estat de les eines, s'aprecia que el desgast és bastant superior per l'avanç de 2000, però no tant accentuat com en l'assaig en sec.

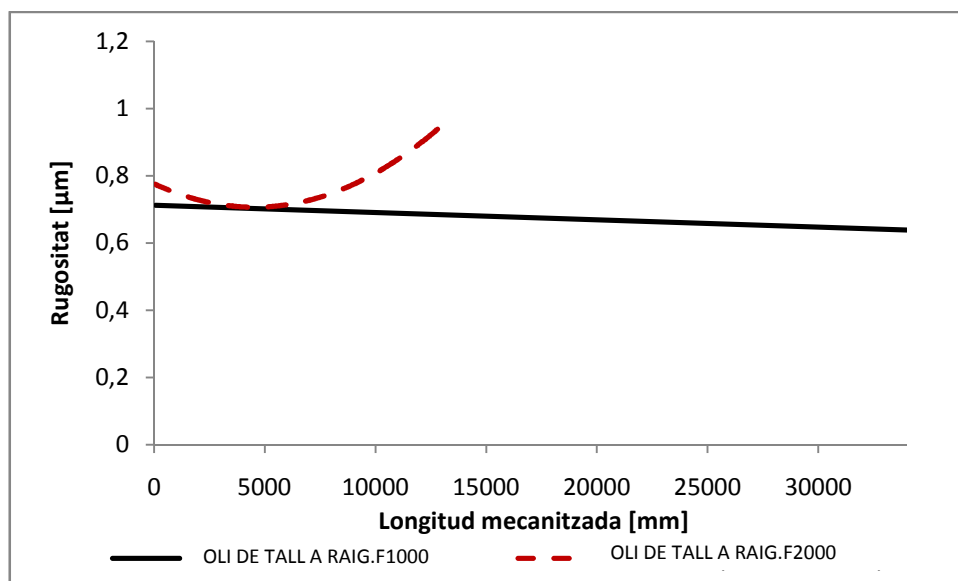


Figura 5-7. Rugositat dels experiments amb eines de 6mm amb refrigeració convencional.

5.2.2 Experimentació amb eines de diàmetre 16mm

A la Figura 5-8 es mostren els dos experiments amb eines de 16mm i sense lubricant. Es pot observar que el fet de doblar la velocitat d'avanç, repercuteix de forma molt important sobre la rugositat superficial, ja que aquesta aproximadament es triplica al doblar la velocitat d'avanç.

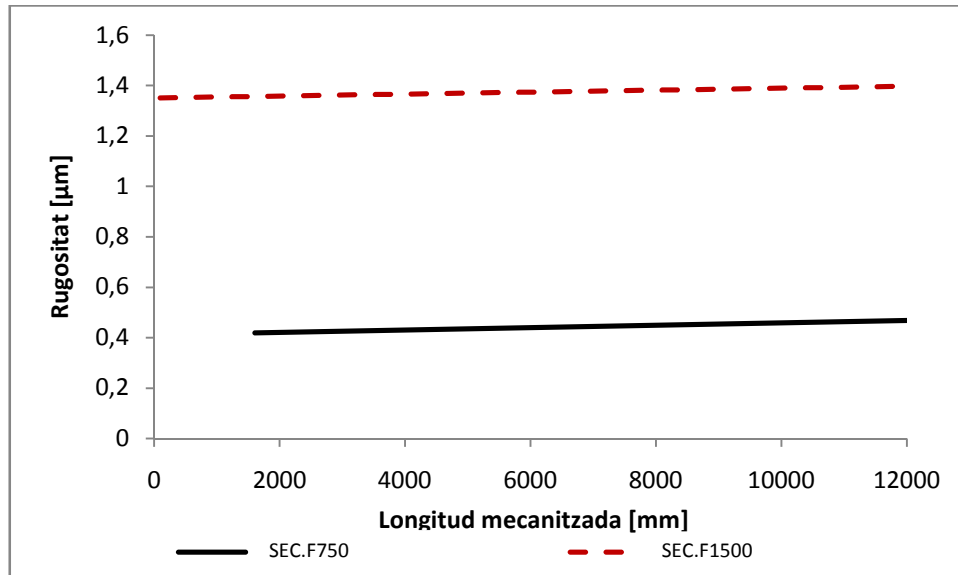


Figura 5-8. Rugositat dels experiments amb eines de 16mm sense refrigerant.

Al introduir el refrigerant, la diferència entre una i altra velocitat d'avanç no és tan important. Al contrari del que passava amb les eines de 6mm, utilitzar el refrigerant a raig o polvoritzat provoca efectes diferents.

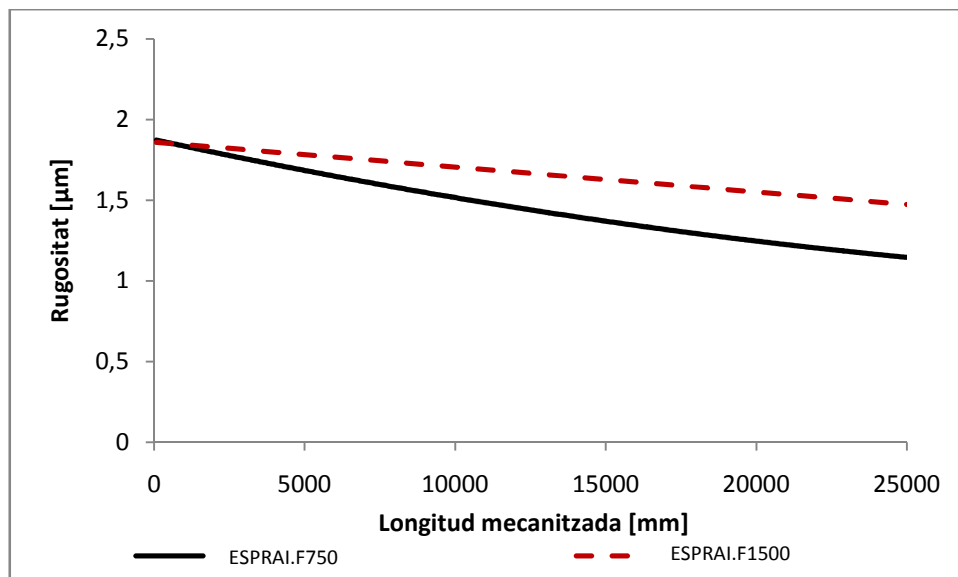


Figura 5-9. Rugositat dels experiments amb eines de 16mm i refrigeració en esprai.

A la Figura 5-9, que mostra els assaigs amb refrigerant subministrat com esprai, s'observa que un augment de la velocitat d'avanç, no comporta un augment important de la rugositat, ja que aquesta sí que augmenta lleugerament, però molt menys que en els altres casos.

Observant la Figura 5-10, que presenta els resultats dels assaigs amb la lubricació convencional, s'aprecia que la rugositat augmenta, menys que en els assaigs en sec, però de forma més important que amb l'altre nivell de refrigerant.

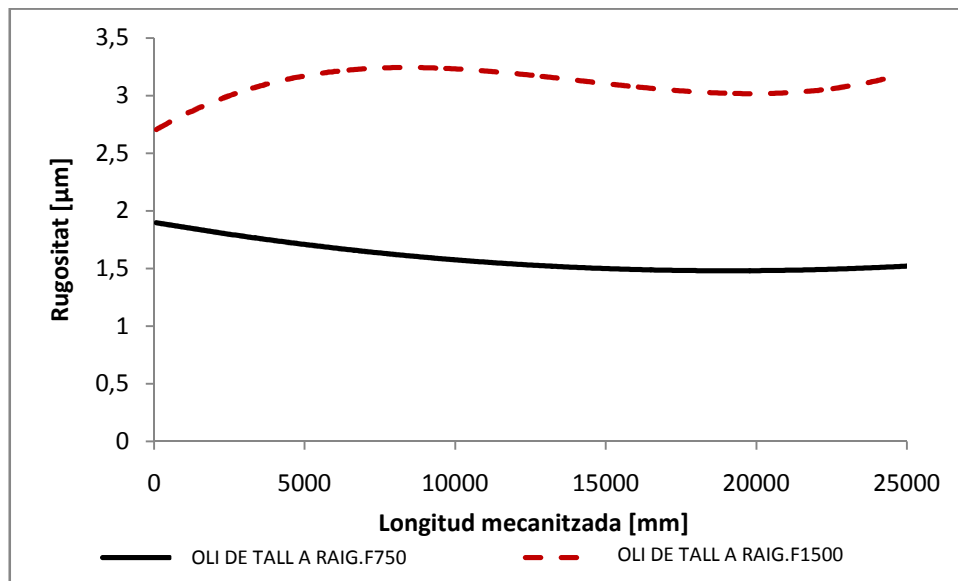


Figura 5-10. Rugositat dels experiments amb eines de 16mm i refrigeració convencional.

Aquesta diferència entre utilitzar aerosol o el sistema tradicional, pot ser degut a la millor eficiència de la lubricació del sistema de mínima quantitat de lubricant que es pretén copiar.

Amb les eines de diàmetre 16mm, es té el mateix espai recorregut per les dues velocitats d'avanç, però al treballar sota condicions de tall inferiors a les màximes especificades pel fabricant, gairebé no s'aprecia desgast sobre les eines, com ja s'ha comentat a l'apartat 3 d'aquest mateix document. Només en el cas de la mecanització sense refrigerant, s'ha arribat a apreciar un lleuger desgast al fil de tall de l'eina.

6 Resum del pressupost

El pressupost total del treball final de carrera, que es troba a complert a l'Annex F, ascendeix a un total de **19990.64€** (dinou mil nou-cents noranta euros amb seixanta-quatre cèntims).

7 Conclusions

S'han dut a terme un conjunt d'experiments per comparar els resultats d'utilitzar un o altre tipus de lubricació en les operacions de mecanitzat per arrencament de ferritja sobre alumini. El paràmetre que s'ha estudiat més detalladament és la rugositat sobre la superfície mecanitzada, però també s'han mesurat valors de la força de tall dels diferents experiments i s'ha valorat l'estat de l'eina un cop realitzat l'experiment.

Al treballar prop de les condicions crítiques subministrades pel fabricant de les eines, l'ús del lubricant permet augmentar la vida d'aquestes considerablement, ja sigui subministrat en forma d'esprai o a raig. Com era d'esperar, quan s'ha treballat amb velocitats d'avanç més elevades, el desgast de l'eina ha augmentat considerablement, sobretot per les eines de 6mm.

L'ús de lubricant té més efectes sobre la rugositat superficial quan es treballa amb eines de diàmetre major. Per les eines de diàmetre 6mm, no es mostra una clara relació entre ús de lubricant i rugositat superficial mesurada. Dins el conjunt d'experiments de les eines de diàmetre 16mm, l'ús de lubricant fa augmentar considerablement la rugositat superficial.

Al treballar amb eines de diàmetre 16mm, s'ha observat que la rugositat superficial ha resultat menor sempre que s'ha subministrat el lubricant en forma d'aerosol. A més, al treballar amb condicions de tall més altes, aquesta diferència ha resultat més evident.

Els millors resultats per al mètode de lubricació proposat s'han donat al treballar amb eines de diàmetre gran, 16mm, i amb les condicions de tall més estrictes, 1500mm/min. Sota aquestes condicions, la rugositat superficial és molt inferior en el cas d'utilitzar el refrigerant polvoritzat o a raig.

S'ha pogut comprovar que l'ús del lubricant polvoritzat, redueix considerablement el desgast de l'eina en comparació a la mecanització en sec. Aquest desgast de l'eina, tot i ser lleugerament superior, és comparable al desgast de l'eina quan s'utilitza el sistema de lubricació convencional.

Al treballar amb el lubricant en esprai, es té un menor consum de lubricant. Aquest aspecte és important per reduir els costos de l'operació, ja que s'utilitza molt menys oli de tall que en el cas de la lubricació a raig.

Les forces de tall, tot i que els resultats han estat molt dispersos i difícilment analitzables, es redueixen quan s'utilitza refrigerant. Dins dels dos nivells de refrigerant, no s'observen grans diferències.

Treballs futurs

- Experimentar amb les eines de 16mm amb condicions de tall properes a les proposades pel fabricant.
- Fer els mateixos assaigs amb diàmetres d'eina superiors i amb valors entre els 6 i els 16mm.
- Experimentar amb altres materials, per exemple acer, per poder arribar a desgastar les eines sota l'ús de lubricant, i així apreciar si hi ha diferències significatives entre les dues metodologies de lubricació.
- Desenvolupar un nou disseny per polvoritzar el refrigerant, que utilitzi l'aire comprimit d'una instal·lació exterior, ja que treballar amb l'aire del propi centre de mecanitzat, a vegades comporta problemes.

Girona, 4 de gener de 2011

Jordi Grabalosa Saubí

8 Bibliografia

- [1] A. ATTANASIO, M. GELFI, C. GIARDINI, C. REMINO. Minimal quantity lubrication in turning: Effect on tool wear. *Wear*. Vol. 260, No. 3. p. 333-338. 2006.
- [2] F. ITOIGAWA, T.H.C. CHILDS, T. NAKAMURA, W. BELLUCO. Effects and mechanisms in minimal quantity lubrication machining of an aluminum alloy. *Wear*. Vol. 260, No. 3. p. 339-344. 2006
- [3] H. POPKE, TH. EMMER, J. STEFFENHAGEN. Environmentally clean metal cutting processes-machining on the way to dry cutting. *Proc. I MECH Eng. B- J. Eng. Manuf.* Vol. 213, No 3, 1999.
- [4] J. VIVANCOS CALVET. Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona. Procesos De Mecanizado. CPDA-Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona, Barcelona, 1996.
- [5] J.F. KELLY, M.G. COTTERELL. Minimal lubrication machining of aluminium alloys. *J. Mater. Process. Technol.* Vol. 120. 2002.
- [6] K. WEINERT, I. INASAKI, J.W. SUTHERLAND, T. WAKABAYASHI. Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. Vol. 53. No 2. p. 511-537. 2004.
- [7] L.N. LÓPEZ DE LACALLE, C. ANGULO, A. LAMIKIZ, J.A. SÁNCHEZ. Experimental and numerical investigation of the effect of spray cutting fluids in high speed milling. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 172. p. 11-15. 2006.
- [8] M. RAHMAN, A. SENTHIL KUMAR, M.U. SALAM. Experimental evaluation on the effect of minimal quantities of lubricant in milling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. Vol. 42, p. 539-547. 2002.
- [9] MITSUBISHI MATERIALS CORPORATION. Herramientas de corte de metal duro. Catálogo general 2010-2011.
- [10] N.R. DHAR, M.W. ISLAM, S. ISLAM, M.A.H. MITHU. The influence of minimum quantity of lubrication (MQL) on cutting temperature, chip and dimensional accuracy in turning AISI-1040 steel. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 171. No. 1. p. 93-99. 2006.
- [11] O.C. MENDES, R.F. ÁVILA, A.M. ABRAO, PEDRO REIS, J. PAULO DAVIM. The performance of cutting fluids when machining aluminium alloys. *Industrial Lubrication and Tribology*. Vol. 58, No. 5. p. 260-268. 2006.

Annex A. Aparells utilitzats

Deckel Maho 64V Linear

És el centre de mecanitzat, mostrat a la Figura A-1, de les instal·lacions del *Grep* a la universitat de Girona. És un centre de mecanització de fusell vertical. Aquest, a part de fer rotar l'eina, té moviment vertical i horitzontal, segons l'operari mira l'aparell. Aquests són els eixos x i z. Pel que fa a la taula, on es fixa el material a treballar, té moviment de profunditat, corresponent a l'eix y. El centre de mecanitzat es comanda mitjançant un control numèric computaritzat (CNC) de la casa *Fanuc*.



Figura A-1. Deckel Maho 64V Linear

El centre de mecanitzat permet treballar amb velocitats de rotació fins a 12000rpm i avanços de fins a 40000mm/min en un espai de treball de 640x600x500mm segons els tres eixos principals. El magatzem d'eines, el qual s'ubica al lateral, a la dreta de la Figura A-1, és de tipus roda, i permet tenir alhora fins a 30 utilatges carregats. Els capçals que s'acoblen al fusell són del tipus *SK 40* segons la normativa DIN 69871.

Rugosímetre Mitutoyo Surftest SV-2000

El rugosímetre, mostrat a la Figura A-2, és un eix que incorpora una punta normalitzada en un extrem i recorre una longitud per tal d'avaluar la rugositat de la superfície en qüestió. Per tal que la mesura sigui correcta, cal que durant tot el recorregut la punta del rugosímetre estigui en contacte amb la superfície.



Figura A-2. Rugosímetre Mitutoyo

Les mesures es fan segons l'estàndard OLD MIX. Pel que fa als perfils de rugositat extrets, es pren el perfil R. Aquest perfil elimina les ondulacions provinents del material, mostrant únicament la rugositat deguda a la mecanització de l'eina estudiada.

La lectura de dades es fa a una velocitat de 0.5m/s al llarg de 7.2mm. D'aquest espai recorregut, es treuen 0.4mm de cadascun dels extrems. És per aquest motiu que, en els perfils de rugositat mostrats, la longitud de mostreig és de 6.4mm. Es pot veure a la Figura A-3 un exemple dels perfils de rugositat extrets, on s'observa que l'eix d'abscisses varia entre 0.4mm i 6.8mm.

Les dades de rugositat es gestionen informàticament amb el programa SurfPack, el qual permet guardar els diferents valors i extreure els perfils de rugositat. Aquest programa també serveix d'interfície entre l'usuari i l'aparell, ja que des de l'ordinador es poden modificar els paràmetres de lectura, escollir la informació extreta per pantalla o calibrar l'aparell entre d'altres funcions.

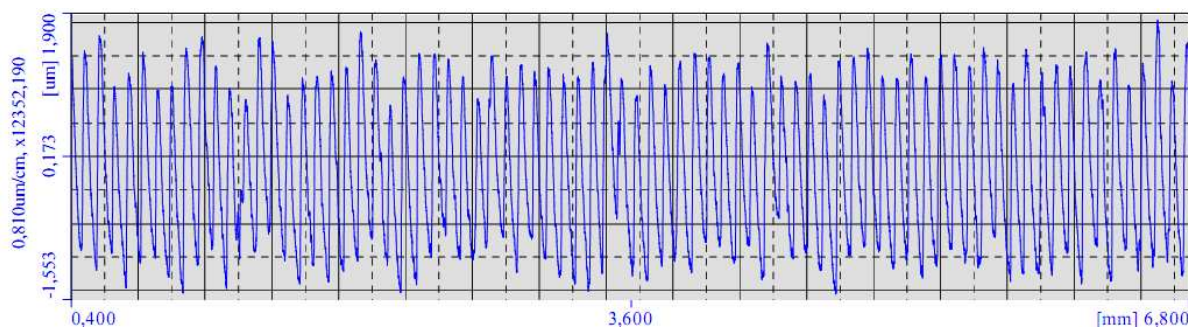


Figura A-3. Perfil de rugositat extret amb el programa SurfPack

Abans de fer les mesures de rugositat, cal calibrar l'aparell. Això es fa mitjançant el programa informàtic i la utilització d'un bloc patró, de rugositat coneguda.

Taula dinamomètrica Kistler 9257B

La taula dinamomètrica s'utilitza per obtenir els valors de força i de moment als tres eixos principals. Al damunt s'hi fixen les mordasses, que serviran per fixar-hi el material a mecanitzar. Tot el conjunt va fixat sobre la taula del centre de mecanitzat. A la Figura A-4 es mostra el muntatge realitzat.



Figura A-4. Taula dinamomètrica Kistler

El programa informàtic *DaqView* serveix per treballar amb les dades provinents de la taula dinamomètrica. Aquestes dades es guarden en un fitxer amb extensió *.bin*, el qual es pot obrir amb el *DaqView*. A més, aquest software permet convertir les dades a altres formats (entre els que destaquen *.txt* o *.mat*) per poder treballar amb aquestes dades utilitzant altres programes amb més possibilitats d'anàlisi.

Annex B. Sistema de polvorització del lubricant

La idea d'utilitzar el refrigerant amb forma d'esprai ha comportat haver d'idear un sistema per automatitzar el procés al màxim possible.

En fases inicials del projecte, es volien fer els assaigs amb un aparell d'ensulfatar dels que s'utilitzen per fumigar, de l'estil del que es mostra a la Figura B-1. Es van fer unes proves inicials, i hi havia el problema de treballar amb la porta oberta, ja que el petit forat que hi ha a la carcassa del centre de mecanitzat no permetia passar tot el sistema amb el polvoritzador a la punta. El centre de mecanitzat permet treballar amb la porta oberta, limitant la potència, però es podia arribar a fer servir.

Tot i això, a part del problema de seguretat de treballar amb la porta oberta, també hi havia el problema que s'havia d'anar manxant contínuament, ja que sinó la pressió de l'aparell variava i el líquid sortia amb diferents quantitats i si la pressió era molt baixa, sortia en forma de raig, que a efectes pràctics era el mateix que injectar l'oli de tall com en el sistema convencional.

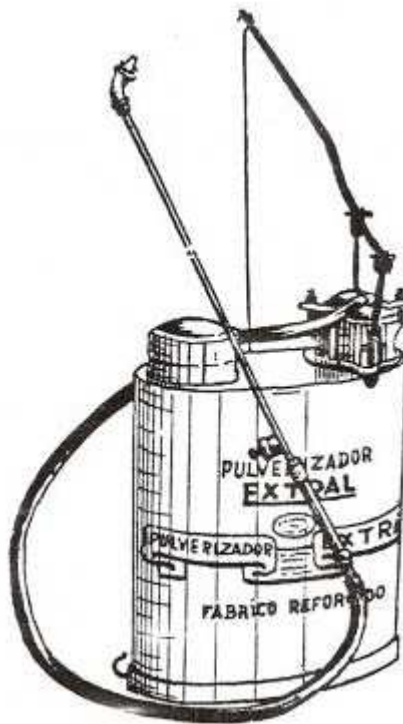


Figura B-1. Aparell d'ensulfatar.

Com que al taller hi ha una instal·lació d'aire comprimit amb un punt de sortida prop del centre de mecanitzat, es va pensar d'utilitzar una pistola per atomitzar, mostrada a la Figura B-2. Aquestes pistoles són les que s'utilitzen en tallers on es pinta xapa de vehicles.

Aquesta opció, només aportava la solució al fet de tenir la pressió i la dosificació constants, però hi havia el problema de continuar treballant amb la porta del centre de mecanitzat oberta.



Figura B-2. Capçal per pintar mitjançant aire comprimit

Finalment, com que el grup havia fet algunes proves amb sistemes gota a gota per subministrar el refrigerant, i aprofitant que el centre de mecanitzat pot treballar amb refrigeració per aire, el qual tira aire a pressió sobre l'eina de tall, es va idear el muntatge mostrat a la Figura B-3.



Figura B-3. Sistema de refrigeració adoptat per fer els assaigs.

El sistema utilitzat aprofita el tub que injecta l'aire comprimit quan es treballa amb refrigeració per aire, introduint el lubricant mitjançant un sistema gota a gota. Això s'ha fet amb un tub de plàstic de diàmetre 1cm, el qual permet el pas del tub de l'aire comprimit i el petit tub del sistema gota a gota. Quan es té l'aire comprimit desconnectat, cauen gotes de lubricant, actuant només el sistema gota a

gota. Quan s'utilitza l'aire a pressió, les gotes de lubricant es veuen impulsades pel flux d'aire, reduint-ne les dimensions i subministrant a l'eina de tall un aerosol format per aire i petites gotes d'oli de tall.

El sistema de dosificació gota a gota, dels que s'utilitzen per subministrar el medicaments per via intravenosa als hospitals, s'ha connectat a un dipòsit, en el nostre cas una ampolla. Cal que aquest dipòsit estigui destapat, ja que s'ha d'anar introduint el refrigerant a mesura que el nivell d'aquest baixa. Com que el consum és molt baix, es pot emplenar el dipòsit fins a un mateix nivell cada vegada que es comença a mecanitzar.

En resum, i tal com es mostra a la Figura B-3, es té un dipòsit que conté l'oli de tall. Mitjançant el regulador, que no és més que un sistema per estrangular el tub, es regula la quantitat de refrigerant que es vol utilitzar. Aquest refrigerant baixa per un tub, al qual se l'hi connecta l'aire comprimit. Per tant, quan es té l'aire comprimit tancat, el sistema funciona com un gota a gota, però quan s'utilitza el mode de refrigeració per aire, aquestes gotes de refrigerant es converteixen en un esprai d'oli de tall que s'injecta directament a l'eina de tall.

El sistema s'ha regulat per tirar una quantitat d'oli de tall de 3mL/min. S'ha utilitzat aquesta quantitat perquè és el punt en el qual es dosifica el refrigerant en forma d'esprai, ja que si es subministra més refrigerant, l'aire comprimit no és capaç de polvoritzar tot el líquid. Si es regula per un consum menor, com que baixen poques gotes d'oli de tall, el sistema treballaria com la refrigeració per aire, subministrant polsos d'oli de tall periòdicament, i el que es busca és una lubricació d'aerosol constant.

Annex C. Programes utilitzats

Conceptes previs

Tot programa de CNC (*computer numerical controlled*) s'inicia amb un identificador. El centre de mecanitzat identifica els programes amb la lletra *O* seguida d'un número, per exemple *O1987*. Aquests programes es formen mitjançant diferents blocs successius, cadascun dels quals s'inicia amb la lletra *N* seguida d'un número. És de gran utilitat enumerar els blocs de 5 en 5 o de 10 en 10, ja que si es fa amb números seguits i es vol inserir un nou bloc entremig caldria moure la resta de números de bloc. Cadascun d'aquests blocs, conté una sèrie de paràmetres, que provoquen un moviment o una acció de l'aparell. A la Taula C-1 es mostren les funcions que s'han utilitzat per als programes d'aquest treball.

Instrucció	Funció realitzada
G00	Posicionament ràpid del capçal
G01	Interpolació lineal entre dos punts
G43	Compensació de la longitud de l'eina
X,Y,Z	Coordenades dels punts segons els tres eixos principals de la màquina
T	Posició de l'eina dins el magatzem d'eines
H	Dades de correcció de l'eina
M03	Rotació del capçal en sentit horari
M06	Canvi d'eina del capçal
M30	Final del programa amb <i>reset</i> de les variables
F	Velocitat d'avanç, en mm/min
S	Velocitat de rotació, en rpm

Taula C-1. Conceptes bàsics de programació per CNC

Programes utilitzats

S'han utilitzat tres programes de control numèric durant la realització del projecte. Un programa per planejar els blocs d'alumini, i els altres dos per mecanitzar amb cadascun dels dos tipus d'eines estudiats. D'aquests dos darrers programes, l'únic paràmetre que varia entre els diferents experiments, és la velocitat d'avanç, al programa de control numèric *F*, ja que el tipus de lubricació de cada assaig s'ha controlat manualment des del control del centre de mecanitzat. La correspondència entre programes i experiments es mostra a la Taula C-2.

Nom del programa	Utilització
O1987	Experiments amb eines de diàmetre 6mm
O1988	Programa per planejar els blocs
O1990	Experiments amb eines de diàmetre 16mm

Taula C-2. Programes de CNC usats.

Codi

Programa O1987

O1987 (EXPERIMENTS EINES D6)

N10 T08 M06

N20 S12000 M03

N30 G00 G90 G54 X7. Y-23.

N40 G43 H08 Z2.

N50 G01 Y10. Z-1. F1000

N60 Y200.

N70 Z2.

N80 X14. Y-23.

N90 G01 Y10. Z-1.

N100 Y200.

N110 Z2.

N120 X21. Y-23.

N130 G01 Y10. Z-1.

N140 Y200.

N150 Z2.

N160 X28. Y-23.

N170 G01 Y10. Z-1.

N180 Y200.

N190 Z2.

N200 X35. Y-23.

N210 G01 Y10. Z-1.

N220 Y200.

N230 Z2.

N240 X42. Y-23.

N250 G01 Y10. Z-1.

N260 Y200.

N270 Z2.

N280 X49. Y-23.

N290 G01 Y10. Z-1.

N300 Y200.

N310 Z2.

N320 X56. Y-23.

N330 G01 Y10. Z-1.

N340 Y200.

N350 Z2.

N360 X63. Y-23.

N370 G01 Y10. Z-1.

N380 Y200.

N390 Z2.

N400 X70. Y-23.

N410 G01 Y10. Z-1.

N420 Y200.

N430 Z2.

N440 M30

Programa O1988

O1988 (PLANEJAR)

N10 T10 M06

N20 S1500 M03

N30 G00 G90 G54 X0. Y-40.

N40 G43 H10 Z5.

N50 G01 Z-1 F250

N60 Y200.

N70 Z5.

N80 G00 X35. Y-40.

N90 G01 Z-1 F250

N100 Y200.

N110 Z5.

N120 G00 X75. Y-40.

N130 G01 Z-1 F250

N140 Y200.

N150 Z5.

N160 M30

Programa O1990

O1990 (EXPERIMENTS EINES D16)

N10 T26 M06

N20 S4500 M03

N30 G00 G90 G54 X10. Y-23.

N40 G43 H26 Z2.

N50 G01 Y10. Z-1. F1500

N60 Y200.

N70 Z2.

N80 X27. Y-23.

N90 G01 Y10. Z-1.

N100 Y200.

N110 Z2.

N120 X44. Y-23.

N130 G01 Y10. Z-1.

N140 Y200.

N150 Z2.

N160 X61. Y-23.

N170 G01 Y10. Z-1.

N180 Y200.

N190 Z2.

N200 X78. Y-23.

N210 G01 Y10. Z-1.

N220 Y200.

N230 Z2.

N240 M30

Annex D. Tractament de forces

La taula d'adquisició de dades *Kistler*, proporciona un fitxer que conté els valors de forces, de moments i de temps de cada assaig. Aquestes forces es donen en les direccions dels tres eixos principals (x, y, z) segons es troba col·locat l'aparell. Per calcular les forces existents entre el material i l'eina, la força de tall, cal fer-ne la suma vectorial, obtenint així la força total.

La força de tall per una mesura té la forma mostrada a la Figura D-1. Es poden apreciar tres zones diferenciades. Al principi, i fins al punt 700, l'eina s'acosta al material i no mecanitza. Entre els punts 700 i 800, aproximadament, es troba un pic de la força de tall. Això és quan l'eina entra al material. Com que l'entrada es fa amb pendent, com ja s'ha explicat, provoca vibracions, i fa que la força es dispari. A continuació, i fins passat el punt 2000, es troba la zona que mostra la veritable força de tall. Finalment, l'eina surt del bloc i deixa de mecanitzar.

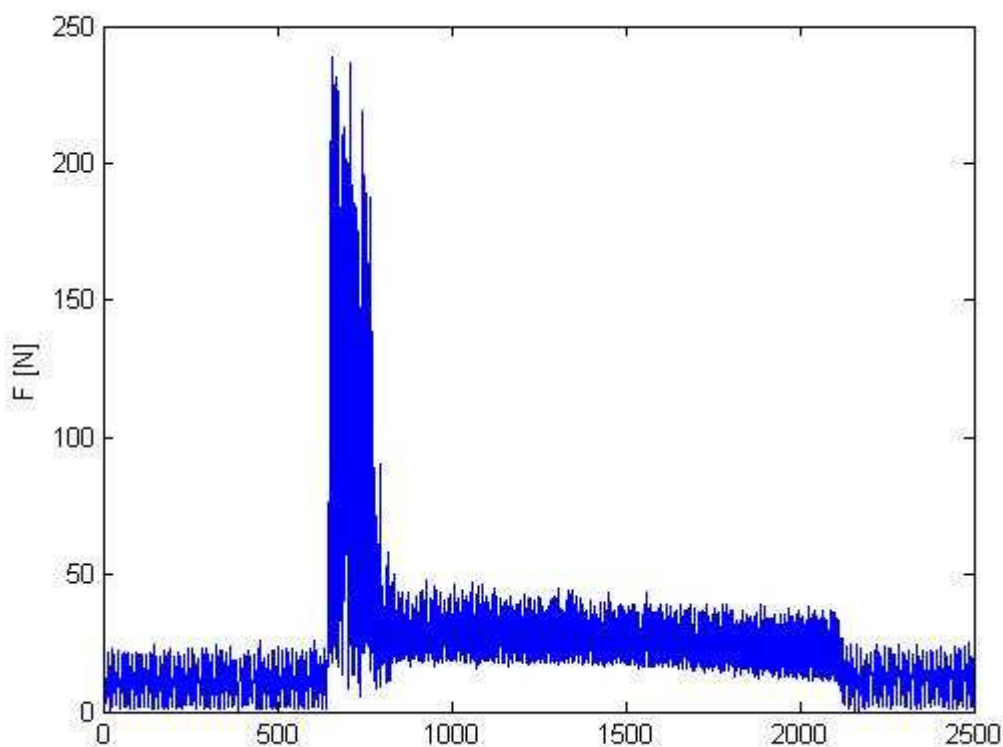


Figura D-1. Perfil de la força de tall d'un experiment concret.

Per tant, per trobar la força de tall de cada experiment, s'ha d'agafar la mitjana dels valors que es trobin en un interval correcte. A la Figura D-2, es mostra la força de tall entre els punts 1000 i 1500 de la Figura D-1. S'observa que aquesta es troba entre 15 i 45N, molt lluny del pic anterior de gairebé 250N.

Cal tenir en compte que els assaigs en els quals s'utilitza refrigerant, aquest provoca una força al impactar sobre la taula dinamomètrica. Per tant, a la força total calculada, cal restar-hi aquesta força, que es troba al voltant dels 5N.

Finalment, només cal prendre la mitjana d'aquest últim interval de valors, i repetir el mateix procés per cadascuna de les ranures mecanitzades.

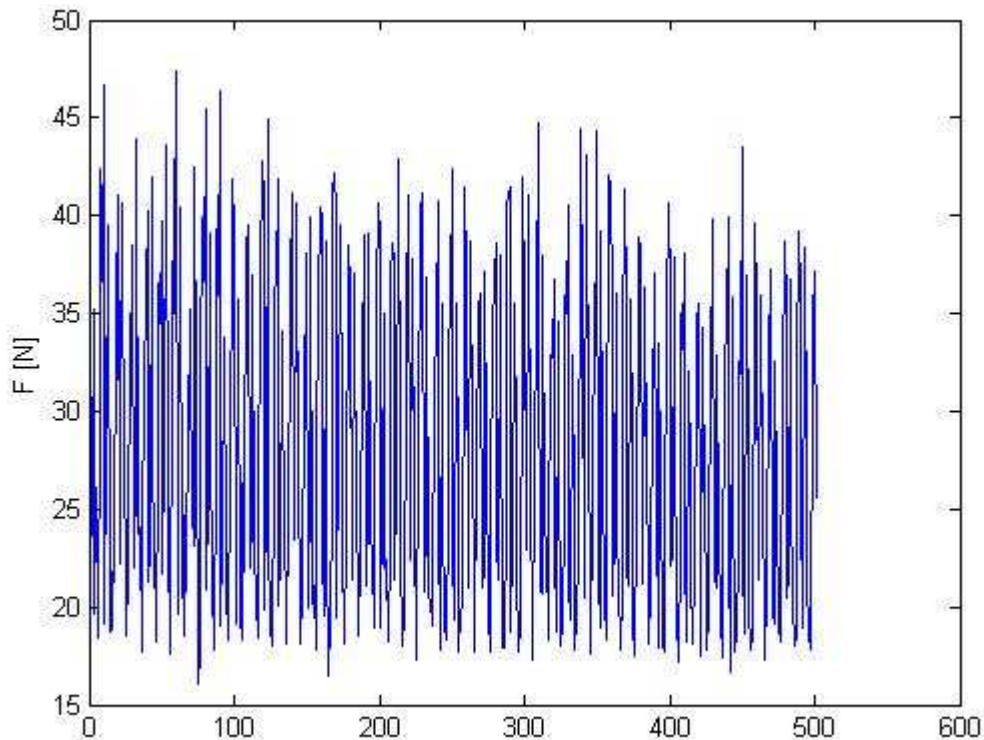


Figura D-2. Força de tall entre els punts 1000 i 1500.

Mitjançant el programa MATLAB, s'ha fet un programa que fa el procediment descrit per cadascuna de les ranures. S'obre cadascun dels fitxers que contenen les forces del experiments, es calcula la força de tall del tram adient i se'n fa la mitjana. Aquests valors es guarden en un arxiu de text, per tenir-los guardats i poder tractar-los posteriorment amb altres programes.

Programa *FT.m*

```
% F's Kistler
clear all;
clc;
for i=1:70
    a=['exp2_',num2str(i),'.mat'];
    load(a);
    b=sqrt((A(:,12).*A(:,12))+(A(:,13).*A(:,13))+(A(:,14).*A(:,14))));
    FT(:,i)=b;
    a=mean(b(1000:1:1500));
    FM(:,i)=a;
end
FM_ = FM';
save FM.txt FM_ -ASCII
plot (FM, '*')
```

Annex E. Dades de rugositat

Experiment 1	
L [mm]	Ra [μm]
50	0,815
150	0,75
250	0,722
350	0,719
450	0,688
550	0,705
650	0,923
750	0,863
850	0,953
950	0,865
1050	1,034
1150	1,16
1250	1,156
1350	1,058
1450	1,064
1550	1,076
1650	0,874
1750	0,794
1850	0,845
1950	0,736
2050	0,578
2140	0,525
2220	0,563
2290	0,522
2350	0,533
2450	0,773
2550	0,613
2650	3,332

Experiment 2	
L [mm]	Ra [μm]
50	0,859
150	0,919
250	0,816
350	0,786
450	0,787
550	0,774
650	0,904
750	0,776

850	0,819
950	0,716
1050	0,702
1150	0,705
1250	0,664
1350	0,68
1450	0,68
1550	0,658
1650	0,657
1750	0,671
1850	0,666
1950	0,661
2050	0,692
2150	0,7
2250	0,69
2350	0,7
2450	0,615
2550	0,709
2650	0,682
2750	0,732
2850	0,717
2950	0,813
3050	0,791
3150	0,723
3250	0,729
3350	0,667
3450	0,671
3550	0,664
3650	0,758
3750	0,672
3850	0,75
3950	0,779
4050	0,53
4150	0,646
4250	0,648
4350	0,546
4450	0,584
4550	0,654
4650	0,666
4750	0,631
4850	0,82

4950	0,79
5050	0,819
5150	0,819
5250	0,869
5350	0,867
5450	0,843
5550	0,882
5650	0,897
5750	0,822
5850	0,88
5950	0,837
6050	0,664
6150	0,609
6250	0,685
6350	0,661
6450	0,655
6550	0,633
6650	0,649
6750	0,69
6850	0,65
6950	0,787
7050	0,594
7150	0,637
7250	0,723
7350	0,668
7450	0,84
7550	0,737
7650	0,826
7750	0,761
7850	0,823
7950	0,774
8050	0,793
8150	0,724
8250	0,788
8350	0,777
8450	0,791
8550	0,726
8650	0,79
8750	0,699
8850	0,755
8950	0,714

9050	0,76
9150	0,658
9250	0,719
9350	0,619
9450	0,618
9550	0,768
9650	0,859
9750	0,793
9850	0,881
9950	0,767
10050	0,872
10150	0,792
10250	0,856
10350	0,797
10450	0,817
10550	0,729
10650	0,857
10750	0,739
10850	0,784
10950	0,796
11050	0,857
11150	0,756
11250	0,878
11350	0,618
11450	0,687
11550	1,097
11650	1,184
11750	1,098
11850	1,178
11950	1,022
12050	1,168
12150	0,785
12250	1,021
12350	0,956
12450	1,013
12550	0,804
12650	1,039
12750	0,827
12850	0,922
12950	0,901
13050	0,921
13150	0,844
13250	0,931
13350	0,803
13450	0,907

Experiment 3	
L [mm]	Ra [μm]
1605	0,425
1815	0,428
2025	0,476
2235	0,428
2445	0,479
2655	0,386
2865	0,392
3075	0,372
3275	0,531
3465	0,456
3655	0,511
3845	0,46
4035	0,442
4225	0,456
4415	0,469
4605	0,421
4780	0,38
4940	0,394
5100	0,391
5260	0,422
5420	0,433
5580	0,428
5740	0,408
5900	0,399
6060	0,387
6220	0,408
6540	0,428
6700	0,463
6860	0,468
7020	0,437
7180	0,436
7365	0,431
7575	0,422
7785	0,426
7995	0,385
8205	0,455
8415	0,42
8625	0,433
8835	0,443
9035	0,486
9225	0,445
9415	0,45
9605	0,468

9795	0,47
9985	0,474
10175	0,448
10365	0,414
10555	0,505
10745	0,433
10935	0,452
11125	0,433
11315	0,496
11505	0,5
11695	0,476
11885	0,407
12060	0,433
12220	0,518
12380	0,457
12540	0,502
12700	0,596
12860	0,482

Experiment 4	
L [mm]	Ra [μm]
80	1,934
240	1,854
400	1,855
560	1,838
720	1,827
880	1,798
1040	1,807
1200	1,801
1375	1,914
1565	1,873
1755	1,935
1945	1,956
2135	1,892
2325	1,847
2515	1,853
2705	1,825
2905	1,869
3115	1,798
3325	1,815
3535	1,794
3745	1,673
3955	1,668
4165	1,841
4375	1,637

4560	1,672
4720	1,681
4880	1,704
5040	1,94
5200	1,887
5360	1,286
5520	1,371
5680	2,021
5840	1,586
6000	1,577
6160	1,647
6320	1,253
6480	1,735
6640	1,625
6800	1,62
6960	1,567
7145	1,615
7355	1,659
7565	1,626
7775	1,61
7985	1,609
8195	1,617
8405	1,622
8615	1,598
8800	1,601
8960	1,599
9120	1,755
9280	1,127
9465	1,588
9675	1,63
9885	1,564
10095	1,621
10305	1,574
10515	1,588
10725	1,544
10935	1,558
11120	1,595
11280	1,87
11440	1,936
11600	1,701
11760	1,87
11920	1,595
12080	1,455
12240	1,417
12400	1,475

12560	1,459
12720	1,493
12880	1,609
13040	1,622
13200	1,517
13360	1,53
13520	1,404
13680	1,496
13840	1,442
14000	1,446
14160	1,463
14335	1,509
14525	1,494
14715	1,507
14905	1,471
15095	1,547
15285	1,471
15475	1,437
15665	1,49
15840	1,466
16000	1,516
16160	1,558
16320	1,454
16480	1,446
16640	1,406
16800	1,367
16960	1,446
17120	1,476
17280	1,459
17440	1,512
17600	1,558
17760	1,504
17920	1,56
18080	1,443
18240	1,458
18400	1,499
18560	1,47
18720	1,569
18880	1,439
19040	1,516
19200	1,519
19360	1,486
19520	1,485
19680	1,539
19840	1,443

20000	1,473
20160	1,466
20320	1,484
20480	1,455
20640	1,451
20800	1,476
20960	1,485
21120	1,469
21280	1,417
21440	1,503
21600	1,455
21760	1,447
21920	1,46
22080	1,45
22240	1,494
22400	1,531
22560	1,527
22720	1,518
22880	1,501
23040	1,52
23200	1,529
23360	1,485
23520	1,51
23680	1,522
23840	1,561
24000	1,697
24160	1,499
24320	1,544
24480	1,533
24640	1,439
24800	1,506
24960	1,459
25120	1,469
25280	1,482

Experiment 5	
L [mm]	Ra [μm]
80	0,637
240	0,601
400	0,675
560	0,665
720	0,608
880	0,625
1040	0,727
1200	0,719

1360	0,677
1520	0,748
1680	0,683
1840	0,739
2000	0,685
2160	0,688
2320	0,652
2480	0,628
2640	0,65
2800	0,644
2960	0,631
3120	0,672
3280	0,674
3440	0,699
3600	0,66
3760	0,665
3920	0,646
4080	0,617
4240	0,691
4400	0,681
4560	0,654
4720	0,697
4880	0,657
5040	0,61
5200	0,677
5360	0,651
5520	0,667
5680	0,651
5855	0,726
6045	0,682
6235	0,633
6425	0,648
6615	0,651
6805	0,644
6995	0,658
7185	0,648
7375	0,644
7565	0,631
7755	0,639
7945	0,604
8135	0,612
8325	0,63
8515	0,591
8705	0,635
8895	0,612

9085	0,612
9275	0,635
9465	0,597
9640	0,609
9800	0,557
9960	0,567
10120	0,555
10280	0,577
10440	0,549
10600	0,603
10760	0,575
10920	0,566
11080	0,575
11240	0,608
11400	0,653
11560	0,631
11720	0,668
11880	0,615
12040	0,583
12200	0,681
12360	0,633
12520	0,621
12680	0,645
12840	0,528
13000	0,609
13160	0,594
13320	0,626
13480	0,604
13640	0,617
13800	0,579
13960	0,565
14120	0,624
14280	0,544
14440	0,482
14600	0,566
14760	0,553
14920	0,554
15080	0,594
15240	0,59
15400	0,579
15560	0,599
15720	0,614
15880	0,534
16060	0,535

Experiment 6	
L [mm]	Ra [μm]
80	0,738
240	0,736
400	0,76
560	0,825
720	0,787
880	0,677
1040	0,766
1200	0,721
1360	0,759
1520	0,739
1680	0,693
1840	0,751
2000	0,716
2160	0,733
2320	0,712
2480	0,747
2640	0,758
2800	0,715
2960	0,766
3120	0,722
3280	0,766
3440	0,708
3600	0,74
3760	0,752
3920	0,742
4080	0,745
4240	0,707
4400	0,73
4560	0,66
4720	0,676
4880	0,605
5040	0,578
5200	0,587
5360	0,595
5520	0,616
5680	0,594
5860	0,689
6060	0,686
6260	0,709
6460	0,761
6660	0,701
6860	0,685
7060	0,649

7260	0,663
7460	0,691
7660	0,693
7860	0,709
8060	0,718
8240	0,702
8400	0,767
8560	0,726
8720	0,758
8880	0,776
9040	0,691
9200	0,727
9360	0,75
9520	0,666
9680	0,681
9840	0,674
10000	0,715
10160	0,717
10320	0,687
10480	0,704
10640	0,692
10800	0,714
10978	0,719
11174	0,613
11370	0,709
11566	0,63
11762	0,711
11958	0,672
12154	0,674
12350	0,577
12546	0,716
12742	0,622
12938	0,625
13134	0,706
13330	0,693
13526	0,671
13722	0,725
13918	0,606
14114	0,719
14310	0,63
14506	0,643
14702	0,641
14898	0,689
15094	0,673
15290	0,641

15486	0,692
15682	0,64
15878	0,604
16074	0,607
16270	0,613
16466	0,635
16662	0,654
16858	0,63
17054	0,651
17250	0,62
17446	0,623
17642	0,631
17838	0,748
18034	0,643
18230	0,657
18426	0,67
18622	0,608
18818	0,614
19014	0,647
19210	0,608
19406	0,607
19602	0,641
19798	0,647
19994	0,678
20190	0,71
20386	0,685
20582	0,655
20778	0,682
20974	0,705
21170	0,703
21366	0,682
21562	0,668
21758	0,678
21954	0,652
22150	0,68
22346	0,654
22542	0,628
22738	0,645
22934	0,699
23130	0,678
23326	0,641
23522	0,681
23718	0,627
23914	0,681
24110	0,694

24306	0,664
24502	0,677
24698	0,684
24956	0,682
25276	0,615
25596	0,638
25916	0,647
26236	0,663
26556	0,671
26876	0,703
27196	0,726
27516	0,672
27836	0,594
28156	0,667
28476	0,669
28796	0,672
29116	0,716
29436	0,666
29756	0,598
30076	0,702
30396	0,657
30716	0,652
31036	0,631
31356	0,66
31676	0,636
31996	0,604
32316	0,717
32556	0,658
32716	0,662
32876	0,646
33036	0,686
33196	0,666
33356	0,609
33516	0,652
33676	0,642
33836	0,666
33996	0,664
34156	0,652
34316	0,636

Experiment 7	
L [mm]	Ra [µm]
95	1,415
285	1,334
475	1,38

665	1,315
855	1,328
1045	1,364
1235	1,346
1425	1,339
1600	1,295
1760	1,354
1920	1,211
2080	1,298
2240	1,241
2400	1,396
2560	1,378
2720	1,321
2880	1,253
3040	1,287
3200	1,364
3360	1,292
3520	1,465
3680	1,264
3840	1,283
4000	1,459
4160	1,356
4320	1,334
4480	1,272
4640	1,248
4800	1,442
4960	1,5
5120	1,47
5280	1,399
5440	1,427
5600	1,319
5760	1,354
5920	1,542
6080	1,261
6240	1,606
6415	1,631
6605	1,389
6795	1,493
6985	1,426
7175	1,478
7365	1,505
7555	1,524
7745	1,538
7920	1,338
8080	1,356

8240	1,312
8400	1,284
8560	1,409
8720	1,399
8880	1,464
9040	1,457
9215	1,346
9405	1,318
9595	1,384
9785	1,461
9975	1,42
10165	1,438
10355	1,328
10545	1,38
10720	1,354
10880	1,312
11040	1,217
11200	1,276
11360	1,38
11520	1,403
11680	1,294
11840	1,306

Experiment 8	
L [mm]	Ra [μm]
80	2,958
240	3,052
400	3,177
560	2,637
720	2,87
880	2,835
1040	2,667
1200	2,77
1360	2,777
1520	2,961
1680	3,003
1840	3,028
2000	3,059
2160	2,742
2320	2,51
2480	2,955
2640	3,025
2800	2,962
2960	2,898
3120	2,807

3280	3,06
3440	3,063
3600	3,034
3760	2,747
3920	2,674
4080	3,014
4240	3,072
4400	3,018
4560	3,099
4720	3,012
4898	3,42
5094	3,332
5290	3,39
5486	3,24
5682	3,3
5878	3,383
6074	3,372
6270	3,441
6466	3,176
6662	3,251
6840	3,203
7000	3,247
7160	3,213
7320	3,379
7480	3,272
7640	3,338
7800	3,246
7960	3,232
8120	3,224
8280	3,205
8440	3,181
8600	3,268
8760	3,138
8920	3,233
9080	3,291
9240	3,354
9400	3,381
9560	3,19
9720	3,041
9880	3,208
10040	3,106
10200	3,167
10360	3,236
10520	3,176
10680	3,143

10840	3,195
11000	3,176
11160	3,295
11320	3,185
11480	3,187
11640	3,205
11800	3,185
11960	3,28
12120	3,265
12280	3,135
12440	3,273
12600	3,162
12760	3,21
12920	3,23
13080	3,061
13240	3,367
13400	3,296
13560	3,216
13720	3,215
13880	3,187
14040	3,361
14200	3,239
14360	3,154
14520	3,305
14680	3,252
14858	3,274
15054	3,104
15250	3,063
15446	2,998
15642	2,805
15838	3,013
16034	3,131
16230	3,122
16426	3,058
16622	3,101
16800	2,995
16960	2,888
17120	2,872
17280	2,851
17440	2,812
17600	3,03
17760	3,066
17920	3,132
18080	3,069
18240	3,101

18400	2,669
18560	3,048
18720	2,939
18880	2,822
19040	3,034
19200	3,091
19360	3,018
19520	3,102
19680	3,022
19840	2,984
20000	3,302
20160	3,169
20320	3,144
20480	3,041
20640	2,766
20800	2,953
20960	2,553
21120	2,863
21280	2,956
21440	2,769
21600	3,114
21760	3,056
21920	3,101
22080	3,123
22240	3,152
22400	3,192
22560	3,122
22720	3,134
22880	3,059
23040	3,08
23200	3,113
23360	3,164
23520	3,122
23680	3,216
23840	3,048
24000	3,174
24160	3,2
24320	3,215
24480	3,162
24640	3,09

Experiment 9	
L [mm]	Ra [µm]
700	0,788
900	0,812

1100	0,796
1300	0,822
1500	0,878
1700	0,851
1900	0,807
2100	0,811
2300	0,841
2500	0,881
2700	0,875
2900	0,895
3100	0,871
3300	0,844
3500	0,864
3700	0,832
3900	0,825
4100	0,828
4300	0,847
4500	0,814
4700	0,826
4900	0,867
5100	0,878
5300	0,901
5500	0,824
5700	0,91
5900	0,875
6100	0,865
6300	0,792
6500	0,911
6700	0,933
6900	0,864
7100	0,864
7300	0,787
7500	0,848
7700	0,825
7900	0,811
8100	0,931
8300	0,911
8500	0,862
8700	0,979
8900	0,878
9100	0,904
9300	0,941
9500	0,959
9700	0,923
9900	0,925

10100	0,991
10300	0,924
10500	0,841
10700	0,835
10900	0,874
11100	0,862
11300	0,865
11500	0,862

Experiment 10	
L [mm]	Ra [µm]
95	0,806
285	0,786
475	0,805
665	0,806
855	0,919
1045	0,876
1235	0,864
1425	0,955
1615	0,9
1805	0,871
1995	0,877
2185	0,865
2375	0,873
2565	0,82
2755	0,834
2945	0,646
3135	0,877
3325	0,809
3515	0,798
3705	0,747
3880	0,754
4040	0,661
4200	0,758
4360	0,786
4520	0,756
4680	0,789
4840	0,703
5000	0,695
5160	0,739
5320	0,651
5480	0,833
5640	0,867
5800	0,797
5960	0,814

6120	0,805
6280	0,827
6440	0,865
6600	0,781
6760	0,839
6920	0,651
7080	0,643
7240	0,689
7400	0,676
7560	0,713
7720	0,738
7880	0,79
8040	0,614
8200	0,755
8360	0,781
8520	0,605
8680	0,748
8840	0,754
9000	0,78
9160	0,766
9320	0,801
9480	0,79
9640	0,804
9800	0,799
9960	0,834
10120	0,702
10300	0,866
10500	0,815
10700	0,828
10900	0,764
11100	0,673
11300	0,697
11500	0,779
11700	0,729
11900	0,768
12100	0,728
12300	0,716
12500	0,749
12700	0,768
12900	0,738
13100	0,724
13300	0,673
13500	0,613
13700	0,622
13900	0,739

14100	0,716
14300	0,705
14500	0,72
14700	0,635
14900	0,639
15100	0,683
15300	0,491
15500	0,645
15700	0,531
15900	0,603
16100	0,608
16300	0,697
16500	0,709
16700	0,692
16900	0,685
17100	0,647
17300	0,6
17500	0,735
17700	0,7
17900	0,691
18100	0,634
18300	0,689
18500	0,534
18700	0,585
18900	0,539
19100	0,494
19300	0,44
19500	0,421
19700	0,407
19895	0,847
20085	0,735
20275	0,621
20465	0,639
20655	0,698
20845	0,685
21035	0,684
21225	0,651
21415	0,676
21605	0,592
21795	0,674
21985	0,671
22175	0,642
22365	0,685
22555	0,642
22745	0,644

22935	0,58
23125	0,743
23315	0,647
23505	0,559
23700	0,654
23900	0,659
24100	0,655
24300	0,694
24500	0,652
24700	0,618
24900	0,665
25100	0,647
25300	0,665
25500	0,609
25700	0,579
25900	0,6
26100	0,65
26300	0,615
26500	0,522
26700	0,634
26900	0,635
27100	0,613
27300	0,632
27500	0,641
27700	0,547
27900	0,498
28100	0,531
28300	0,522
28500	0,502
28700	0,463
28900	0,528
29100	0,513
29300	0,543
29500	0,524
29700	0,548
29900	0,524
30100	0,63
30300	0,647
30500	0,634
30700	0,66
30900	0,675
31100	0,599
31300	0,541
31500	0,535
31700	0,546

31900	0,546
32100	0,584
32300	0,489
32500	0,647
32700	0,673
32900	0,673
33100	0,665
33300	0,559
33500	0,544
33700	0,718
33900	0,667
34100	0,643
34300	0,621
34500	0,66
34700	0,639

Experiment 11	
L [mm]	Ra [μm]
80	1,71
240	1,818
400	1,813
560	1,784
720	1,796
880	1,718
1040	1,785
1200	1,783
1360	1,85
1520	1,475
1680	1,853
1840	1,772
2000	1,767
2160	1,779
2320	1,68
2480	1,446
2640	1,621
2800	1,601
2960	1,669
3120	1,638
3295	1,707
3485	1,763
3675	1,769
3865	1,756
4055	1,936
4245	1,881
4435	1,933

4625	1,938
4815	1,965
5005	1,845
5195	1,88
5385	1,725
5560	1,833
5720	1,874
5880	1,886
6040	1,872
6200	1,743
6360	1,825
6520	1,913
6680	1,73
6840	1,577
7000	1,681
7160	1,64
7320	1,581
7480	1,6
7640	1,574
7800	1,534
7960	1,594
8120	1,587
8280	1,617
8440	1,588
8600	1,578
8760	1,578
8920	1,558
9080	1,577
9240	1,587
9400	1,593
9560	1,482
9720	1,481
9880	1,489
10040	1,472
10200	1,466
10360	1,46
10520	1,412
10680	1,645
10840	1,454
11000	1,383
11160	1,431
11320	1,482
11480	1,497
11640	1,434
11800	1,383

11960	1,4
12120	1,451
12280	1,382
12440	1,384
12600	1,342
12760	1,356
12920	1,377
13080	1,388
13240	1,327
13400	1,355
13560	1,349
13720	1,381
13880	1,374
14040	1,392
14200	1,343
14360	1,356
14520	1,367
14680	1,324
14840	1,338
15000	1,333
15160	1,34
15320	1,328
15480	1,333
15640	1,336
15800	1,272
15960	1,337
16120	1,286
16280	1,307
16440	1,278
16600	1,31
16760	1,277
16920	1,277
17080	1,328
17240	1,323
17400	1,248
17560	1,255
17720	1,319
17880	1,259
18040	1,301
18200	1,288
18360	1,308
18520	1,266
18680	1,282
18840	1,293
19000	1,301

19160	1,248
19320	1,277
19480	1,213
19640	1,215
19800	1,309
19960	1,301
20120	1,207
20280	1,111
20440	1,29
20600	1,227
20760	1,231
20920	1,227
21080	1,256
21240	1,199
21400	1,187
21560	1,168
21720	1,129
21880	1,243
22040	1,203
22200	1,169
22360	1,172
22520	1,194
22680	1,22
22840	1,244
23000	1,213
23160	1,187
23320	1,214
23480	1,209
23640	1,185
23800	1,201
23960	1,22
24120	1,211
24280	1,166
24440	1,187
24600	1,19
24760	1,187
24920	1,208
25080	1,211

Experiment 12	
L [mm]	Ra [µm]
80	1,855
240	1,813
400	1,933
560	1,853

720	1,852
880	1,779
1040	1,806
1200	1,73
1360	1,748
1520	1,859
1680	1,768
1840	1,972
2000	1,963
2160	1,938
2320	1,807
2480	1,773
2640	1,865
2800	1,77
2960	1,837
3120	1,77
3280	1,808
3440	1,784
3600	1,817
3760	1,745
3920	1,763
4080	1,79
4240	1,92
4400	1,731
4560	1,814
4720	1,765
4880	1,785
5040	1,801
5200	1,92
5360	1,93
5520	1,756
5680	1,806
5840	1,807
6000	1,784
6160	1,753
6320	1,706
6480	1,763
6640	1,729
6800	1,855
6960	1,675
7120	1,854
7280	1,78
7440	1,861
7600	1,693
7760	1,695

7920	1,748
8098	1,289
8294	1,683
8490	1,716
8686	1,745
8882	1,729
9078	1,657
9274	1,822
9470	1,772
9666	1,755
9862	1,902
10058	1,593
10254	1,699
10450	1,69
10646	1,638
10842	1,698
11038	1,665
11234	1,625
11430	1,665
11626	1,63
11822	1,599
12000	1,672
12160	1,72
12320	1,642
12480	1,642
12640	1,704
12800	1,686
12960	1,692
13120	1,629
13280	1,581
13440	1,572
13600	1,587
13760	1,645
13920	1,588

14080	1,625
14240	1,593
14400	1,64
14560	1,639
14720	1,661
14880	1,716
15040	1,662
15200	1,611
15360	1,624
15520	1,598
15680	1,714
15840	1,592
16000	1,604
16160	1,619
16320	1,674
16480	1,597
16640	1,545
16800	1,642
16960	1,627
17120	1,607
17280	1,606
17440	1,624
17600	1,602
17760	1,533
17920	1,589
18080	1,593
18240	1,6
18400	1,579
18560	1,569
18720	1,568
18880	1,621
19040	1,632
19200	1,573
19360	1,672

19520	1,561
19680	1,583
19840	1,59
20018	1,482
20214	1,45
20410	1,506
20606	1,495
20802	1,507
20998	1,57
21194	1,584
21390	1,438
21586	1,463
21782	1,436
21960	1,503
22120	1,491
22280	1,473
22440	1,462
22600	1,474
22760	1,466
22920	1,579
23080	1,559
23240	1,494
23400	1,477
23560	1,496
23720	1,542
23880	1,49
24040	1,455
24200	1,546
24360	1,445
24520	1,529
24680	1,527
24840	1,56
25000	1,518

Annex F. Pressupost

MATERIAL	Quantitat (u)	Preu unitari (€/u)	Preu total (€)
Eines diàmetre 6mm	8	17.28	138.24
Eines diàmetre 16mm	6	69	414
Bloc alumini	1	153.4	153.4
COST MATERIAL			705.64 €

MÀ D'OBRA	Hores	Preu unitari (€/h)	Preu total (€)
Recopilació d'informació	15	0	0
Aprendre a utilitzar maquinària	20	0	0
Programació CNC	3	20	60
Centre de mecanitzat	250	50	12500
Rugosímetre	50	40	2000
Taula dinamomètrica	125	25	3125
Reunions	15	40	600
Tractament de dades	50	12	600
Redacció del projecte	50	8	400
COST MÀ D'OBRA			19285 €

COST TOTAL 19990.64 €